A. DUPONT

A. CASTELL

technologie

PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

professions de la mécanique

Classe de 1re des Lycées Techniques

1re partie

MÉTROLOGIE DES SURFACES

DESFORGES
PARIS

OUVRAGES DES MÊMES AUTEURS

« TECHNOLOGIE PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE »

— Anciennes classes de 4e des Lycées Techniques et classes de 1re année des Collèges d'Enseignement Technique, 6e édition 1964.

— Anciennes classes de 3e des Lycées Techniques et classes de 2e année des Collèges d'Enseignement Technique, 6e édition 1964.

— Classes de 2e des Lycées Techniques, de 3e année des Collèges d'Enseignement Technique, de Préparation de l'examen probatoire du baccalauréat, 6e édition 1963.

— Classe de 1re des Lycées Techniques — 2e partie — **Étude fonctionnelle des machines-outils,** 2e édition 1961.

— 3e partie, **Travaux réalisés sur les machines-outils,** 1re édition 1964.

« ORGANISATION INDUSTRIELLE »

par A. CASTELL

INITIATION — Classes de 1re et de Technique industrielle des Lycées Techniques, 5e édition 1963.

APPLICATIONS — Classes de Techniciens et de Techniciens supérieurs — Plan d'organisation adapté aux moyennes et petites entreprises.

TECHNOLOGIE
PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

PROFESSIONS DE LA MÉCANIQUE

Classe de 1re des Lycées Techniques
(EX COLLÈGES TECHNIQUES)

1re partie
MÉTROLOGIE DES SURFACES

A. DUPONT
Chef des travaux au Lycée Technique d'Etat d'Aulnay-sous-Bois

A. CASTELL
INGÉNIEUR A. ET M.
Directeur du Lycée Technique d'État de Corbeil-Essonnes

— 3e ÉDITION —

DESFORGES
ÉDITEUR
29, quai des Grands-Augustins — Paris 6e
1964

Tous droits de traduction, de production et d'adaptation réservés pour tous pays.
© by DESFORGES Paris 1958.

TABLE DES MATIÈRES

MÉTROLOGIE DES SURFACES

Pages

Introduction.

Le contrôle rapporté aux propriétés géométriques et au mode de génération des surfaces élémentaires..... 11
Etat géométrique et contrôle de forme d'une surface..... 13

VÉRIFICATIONS MACROGÉOMÉTRIQUES

VÉRIFICATION DES SURFACES PLANES

Opportunité de la vérification..... 16

Procédés de vérification des surfaces planes.

Vérification sans mesure : au marbre, à la règle, méthode des trois marbres..... 18
Mesure des défauts : à la règle, au niveau à bulle, à la règle optique..... 22
Exploitation des mesures et retouche de la surface..... 29

VÉRIFICATION DES SURFACES CYLINDRIQUES

Opportunité de la vérification..... 31

Procédés de contrôle des surfaces cylindriques.

Détection des défauts : par contrôle au comparateur, par mesure du diamètre..... 34
Mesure et localisation des défauts : mesure du diamètre, mesure des défauts de forme, contrôle de la rectitude de la génératrice et de la perpendicularité de la génératrice et du cercle directeur..... 35
Contrôle de la correction fonctionnelle d'un ajustement cylindrique : au tampon et à la bague, à la jauge plate et à la broche sphérique, au calibre à mâchoires, contrôle rationnel..... 41

VÉRIFICATION DES SURFACES CONIQUES

Analyse préalable..... 45

Procédés de contrôle des surfaces coniques.

Contrôle de la conicité et de la rectitude de la génératrice : détection des défauts de rectitude, contrôle par comparaison avec un étalon, contrôle par mesure..... 47
Contrôle et mesure du diamètre de base : par comparaison avec un étalon, par mesure à l'aide de piges ou d'une bille..... 49
Contrôle des défauts de forme de la section..... 52

VÉRIFICATION DES SURFACES SPHÉRIQUES

Pages

Analyse préalable..... 53

Procédés de contrôle des surfaces sphériques.

Détection des défauts de forme : par observation visuelle à la lunette, par mesure des écarts au comparateur..... 55

Vérification du diamètre et mesure des défauts : sur vé à trois touches, sur appui plan, pour surfaces sphériques intérieures, pour surfaces sphériques de grande courbure..... 55

Vérification de la position de la surface sphérique..... 57

VÉRIFICATION DE LA POSITION RELATIVE DES SURFACES

Mesure des distances entre surfaces.

Entre deux plans parallèles, entre l'axe d'un cylindre et un plan, entre l'axe d'un cône et un plan, entre l'axe d'une sphère et un plan, entre les axes de deux surfaces de révolution, entre l'axe d'une surface de révolution et l'arête d'un dièdre..... 59

Vérification du parallélisme des surfaces.

Parallélisme de deux surfaces planes, d'un alésage et d'une surface plane, de deux alésages..... 63

Vérification de la position angulaire des surfaces.

Vérification par coïncidence, par mesure directe, par le calcul et mesure indirecte.. 65

Vérification d'une forme composée d'éléments plans.

Utilisation du microscope goniométrique..... 71

VÉRIFICATION DE SURFACES PARTICULIÈRES

Vérification des filetages.

Contrôle des surfaces hélicoïdales..... 73

Procédés de contrôle des filetages : sans mesure, à l'aide de calibres à limites, par mesure du diamètre, contrôle du profil et du pas..... 75

Vérification des dentures d'engrenages.

Dentures droites en développante de cercle : caractéristiques, génération, défauts. 81

Procédés de contrôle des dentures d'engrenages : contrôle de la concentricité, du diamètre primitif, de l'épaisseur de la dent, du pas, de la distorsion..... 85

Vérification des cannelures.

Contrôle de la certitude du montage et de la correction géométrique..... 91

VÉRIFICATIONS MICROGÉOMÉTRIQUES

Influence des défauts microgéométriques..... 93

Mesure des défauts microgéométriques : à l'aide du palpeur pneumatique « Solex Nicolau », par microtopographie optique, à l'aide du rugosimètre électrique..... 94

ORGANISATION DU CONTROLE

Pages

Nécessité du contrôle 97

Contrôle complet 97

Systèmes de contrôle dimensionnel.

Contrôle total, contrôle partiel, contrôle automatique et self-contrôle, contrôle statistique 97

Appareils de contrôle adaptés aux travaux de série.

Utilisation de voyants de signalisation pour le contrôle simultané de plusieurs cotes. 102

Gammes de contrôle.

Etude du contrôle d'une pièce mécanique fabriquée en moyenne série : adaptation des moyens de contrôle réalisation d'appareillages spéciaux 104

AVANT-PROPOS

Nous avons considéré la matière des ouvrages précédents (classes de 4e, 3e et 2e des Lycées Techniques) **comme un outil indispensable** à la continuation de l'étude de la technologie et ceci explique que nous ayons découpé le texte en leçons suivies de résumés.

Avec le programme de la classe de 1re, il ne s'agit plus de leçons proprement dites, mais d'application raisonnée. Nous nous sommes donc efforcés de développer chez l'élève l'esprit d'analyse et de méthode sans perdre de vue que tout doit être mis en œuvre pour permettre le choix de la solution la mieux adaptée au problème posé. C'est ainsi que se concrétise l'utilisation des connaissances précédemment acquises.

Il résulte de l'orientation ainsi donnée à ce nouvel ouvrage que le maître est seul juge pour s'étendre comme il le désire sur chaque point particulier et que la division en leçons ne saurait convenir. Nous avons donc abandonné à la fois le découpage du texte et la rédaction des résumés.

Ce cours de la classe de 1re comprend trois volumes : celui-ci consacré à la **« métrologie »**, un deuxième traitant de **l'étude fonctionnelle des machines-outils.** Enfin un volume plus important sur les **« Travaux réalisés sur les machines-outils ».**

LES AUTEURS.

MÉTROLOGIE DES SURFACES

INTRODUCTION

I. — LE CONTROLE RAPPORTÉ AUX PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES DES SURFACES ÉLÉMENTAIRES

Toute pièce mécanique est en première analyse un solide géométrique défini par **sa forme et ses dimensions.**

La forme elle-même n'est définie que par un certain nombre de **surfaces élémentaires** le plus souvent planes ou de révolution.

Les limites des surfaces élémentaires, leurs positions relatives, sont marquées ou mesurées par des **dimensions,** ces dimensions pouvant être **des longueurs** ou **des angles.**

Ainsi, le contrôle d'une pièce mécanique comprendra toujours :

— la vérification de la correction géométrique de chaque surface élémentaire composante ;

— la mesure des dimensions des surfaces élémentaires composantes et de leurs positions relatives.

Exemple : La pièce représentée par la figure 1 est limitée par des surfaces planes et une surface cylindrique. Son contrôle comprendra :

— la vérification de planéité des six faces du prisme et de la base du cylindre ;
— la vérification de parallélisme des faces planes correspondantes ;
— la vérification d'au moins un trièdre du prisme ;
— la vérification de la correction géométrique de la surface cylindrique ;
— la vérification du parallélisme de l'axe du cylindre et des faces correspondantes du prisme ;
— la mesure des distances entre faces parallèles ;
— la mesure du diamètre du cylindre ;
— la mesure de la distance de l'axe du cylindre à au moins deux faces adjacentes du prisme.

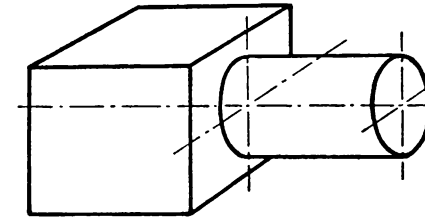


Fig. 1 : Contrôle rapporté aux propriétés géométriques

Il est évident que ce contrôle répété sur chaque unité fabriquée nécessiterait un temps incompatible avec celui que demanderait la fabrication proprement dite. Il sera

donc nécessaire de **limiter au minimum les opérations de contrôle eu égard à la fonction de l'organe fabriqué** et même, le plus souvent, **au mode de génération de la surface élémentaire obtenue.**

Ainsi, un calibre de précision, par exemple, une équerre, un mandrin de reprise, nécessiteront un contrôle quasi total. Au contraire, un palier lisse, par exemple, ne nécessitera que le contrôle de son alésage et de sa semelle. Et même, en raison du procédé de fabrication (montage d'alésage en particulier) il se peut que ce contrôle se réduise à la seule mesure du diamètre d'alésage.

II. — LE CONTROLE ADAPTÉ AU MODE DE GÉNÉRATION DES SURFACES ÉLÉMENTAIRES

Toute surface élémentaire est généralement obtenue, en fabrication mécanique, par la combinaison de mouvements : mouvement de coupe et mouvement d'avance principalement.

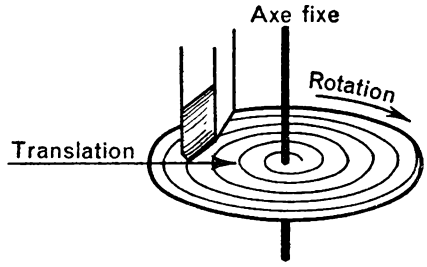


Fig. 2 : Génération d'une surface

C'est l'outil qui, par la trajectoire du mouvement résultant, engendre la surface. Les sillons qu'il laisse sont l'image frappante de cette trajectoire. C'est une spirale dans le cas de la figure 2.

Si les mouvements composants répondaient parfaitement à leur définition, les propriétés géométriques de la surface engendrée seraient pleinement satisfaites.

Or il se trouve que les mécanismes qui créent les mouvements composants ont des défauts originels permanents ou des défauts accidentels consécutifs à l'usure et aux déformations en particulier. Ainsi, le banc de tour se creuse dans la zone où le traînard se meut le plus fréquemment, le porte-outil, en raison de son porte-à-faux, fléchit sous l'effort de coupe, la pièce en rotation se déforme ou déforme son support par action du *balourd*, l'outil générateur s'émousse et coupe mal.

Il s'ensuit que **le contrôle de la surface engendrée se trouve lié à celui des éléments générateurs.** Leur plus ou moins grande imperfection imposera une investigation plus ou moins poussée. **Lorsque les éléments générateurs seront jugés suffisamment conformes à leur définition, tout contrôle de forme de la surface engendrée deviendra inutile et seul s'imposera le contrôle des dimensions.**

Il en sera souvent ainsi en fabrication courante de série bien organisée, c'est-à-dire soigneusement préparée, réalisée avec des outillages précis et de qualité sur des machines outils répondant aux exigences des normes de leur propre contrôle (1).

---

(1) Normes de réception des machines-outils établies par P. Salmon, ingénieur général des fabrications d'armement. Editions « Société des Publications Mécaniques », 15, rue Bleue, Paris (9e).

III. — ÉTAT GEOMÉTRIQUE D'UNE SURFACE

L'état d'une surface usinée est caractérisé par l'importance des défauts qu'elle présente par rapport à la surface géométrique idéale. Les défauts sont **macrogéométriques** ou **microgéométriques** selon qu'ils affectent la forme générale de la surface ou, au contraire, son aspect local fortement grossi.

1° Défauts macrogéométriques.

Ce sont des défauts de forme générale (fig. 3). Ils déterminent des sinuosités très allongées par rapport à leur hauteur **h.** Cette hauteur est la caractéristique de **l'exactitude,** ou de la **correction de la surface.**

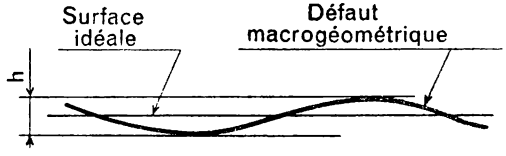


Fig. 3: Défaut macrogéométrique

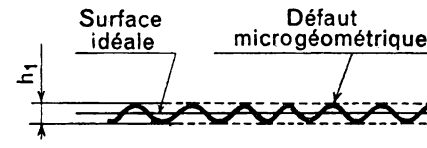


Fig. 4: Défaut microgéométrique

2° Défauts microgéométriques.

Ce sont des défauts de lissage (fig. 4). Ils se présentent sous la forme de sinuosités de faible amplitude et peu allongés. Leur profondeur h_1 caractérise la **rugosité de la surface,** ou encore son **état de fini.**

3° Etat de la surface.

Les défauts microgéométriques se superposent aux défauts macrogéométriques. Il en résulte que toute surface peut affecter l'une des formes ci-après (fig. 5) :

— surface exacte lisse (I);
— surface inexacte lisse (II);
— surface exacte rugueuse (III);
— surface inexacte rugueuse (IV).

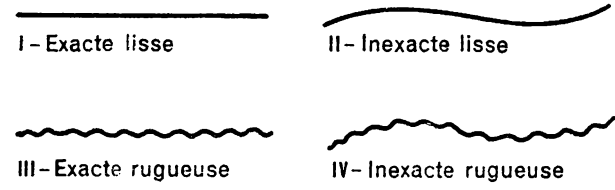


Fig. 5: Différentes formes de surfaces

La surface idéale, exacte et lisse, ne pouvant pas être obtenue, on est conduit à définir des limites entre lesquelles la surface réelle acceptable fonctionnellement pourra se situer.

L'intervalle de tolérance **IT** est délimité par deux surfaces idéales qui constituent les enveloppes limites maxi S_1 et mini S_2 (fig. 6 et 7).

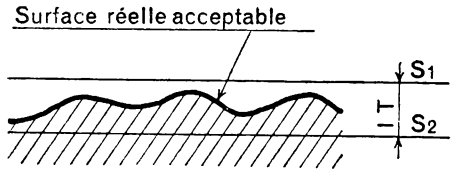


Fig. 6: La surface réelle est acceptable si elle est contenue dans l'intervalle de tolérance I T

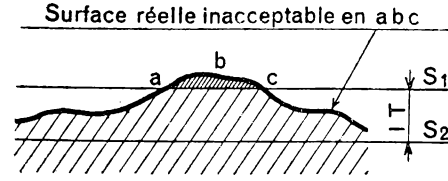


Fig. 7: La surface réelle n'est pas acceptable si elle sort de l'intervalle de tolérance I T

IV. — CONTROLE DE FORME D'UNE SURFACE

Le contrôle de forme d'une surface comprendra toujours :

— **la recherche des défauts macrogéométriques** et, le cas échéant, leur mesure ;

— **la recherche des défauts microgéométriques** et leur mesure.

Mais les défauts microgéométriques présentent d'une région à la région voisine des variations de profil et de profondeur. Il faut donc définir leur valeur moyenne théorique.

A ce propos, on considère (fig. 8) :

— **la surface imaginaire idéale S_i** qui se trouverait à la limite des creux ;

— **la surface enveloppe S_e** qui se trouve à la limite des crêtes et sur laquelle vient pratiquement reposer le palpeur de l'instrument de vérification macrogéométrique ;

Fig. 8: Caractéristiques des défauts superficiels d'une surface

— **la surface théorique moyenne S_m, telle que la superficie totale des crêtes situées au-dessus d'elle soit égale à la superficie totale des creux situés au-dessous.**

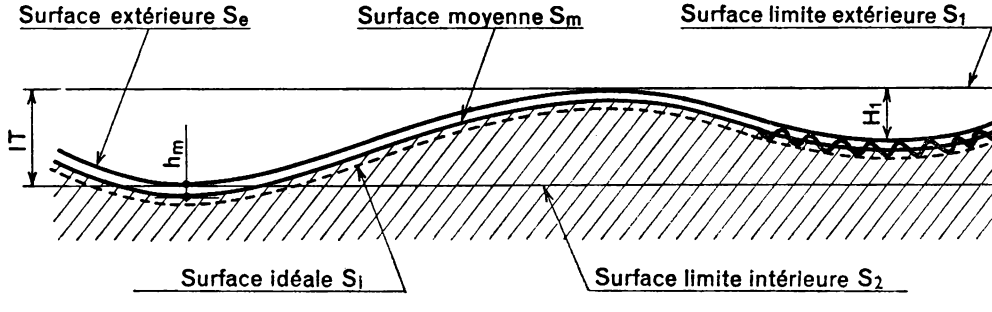


Fig. 9: La surface n'est acceptable que si le défaut microgéométrique au point considéré est faible par rapport à l'intervalle de tolérance I T

La position de la surface moyenne par rapport à la surface enveloppe mesure **la hauteur moyenne h_m des défauts microgéométriques.**

Considérant maintenant les deux limites S_1 et S_2 de la surface idéale (fig. 9) distantes de l'intervalle de tolérance **IT,** le défaut macrogéométrique local H_1 et le défaut microgéométrique moyen h_m se composeront au détriment des qualités de durée de la surface.

L'usure sera en effet d'autant plus rapide que la hauteur moyenne h_m des défauts microgéométriques sera plus grande. La surface ne sera donc acceptable que si, H_1 restant dans l'intervalle **IT,** h_m est faible par rapport à **IT.**

VÉRIFICATIONS MACROGÉOMÉTRIQUES

Vérification des surfaces planes

OPPORTUNITÉ DE LA VÉRIFICATION

Avant d'entreprendre l'étude des moyens matériels de contrôle des surfaces planes nous allons définir les circonstances qui nous guideront vers la nécessité ou l'inutilité du contrôle et, le cas échéant, vers le but précis à atteindre.

A. GÉNÉRATION DE LA SURFACE PLANE

Une surface plane est généralement obtenue par la combinaison de mouvements comme l'illustre la figure 10. L'outil, qu'il soit d'enveloppe ou de forme, engendre la surface.

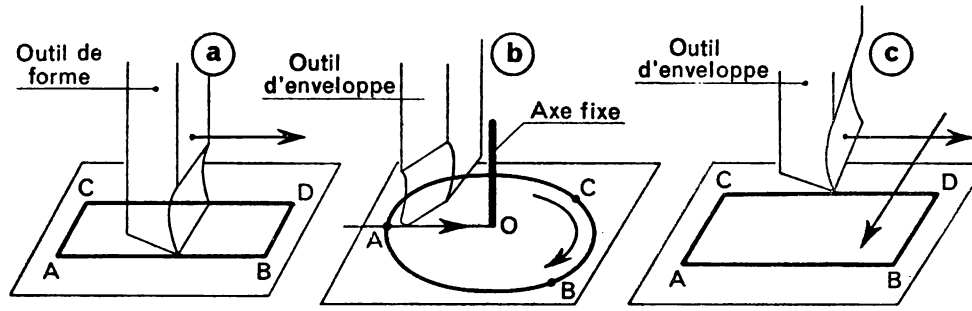


Fig.10: Génération de la surface plane :
a) par un seul mouvement rectiligne
b) par un mouvement circulaire & un mouvement rectiligne
c) par deux mouvements rectilignes

B. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

La trajectoire du mouvement rectiligne générateur n'est pas une droite parfaite et, lorsque le mouvement est alternatif, les positions relatives qu'elle prend ne sont pas parallèles entre elles.

De même, la trajectoire du mouvement circulaire s'écarte du plan parfait normal à l'axe de rotation.

Il s'ensuit (fig. 10) :

— qu'une ligne droite parfaite passant par les points **A** et **B** quelconques de la surface ne coïncidera pas avec elle ;

qu'on ne pourra pas trouver dans la surface une ligne droite passant par un point quelconque **C** qui soit parallèle à la ligne droite parfaite passant par **A** et **B** ;

— qu'un plan parfait ne coïncidera pas avec la surface.

C. ADAPTATION DU CONTROLE

Les remarques géométriques qui précèdent font apparaître les méthodes de contrôle qu'on adoptera le plus souvent :

1° Coïncidence d'une règle avec le plan dans toutes ses positions possibles. **C'est ainsi qu'on procédera lorsqu'on ne recherchera pas une très grande précision.**

2° Parallélisme de droites portées par le plan. **C'est ainsi qu'on procédera en fait en mesurant au niveau ou à la règle optique la dénivellation entre deux points quelconques du plan.**

3° Coïncidence avec un plan parfait. **C'est ainsi qu'on procédera pour localiser la position de la surface qui se trouve dans le plan parfait matérialisé par un marbre ou par un plan étalon en verre.**

Cas de la génération du plan par usinage mécanique ordinaire.

Il sera souvent inutile d'appliquer la méthode choisie à toute l'aire de la surface à contrôler. Nous avons vu en effet que les mouvements générateurs peuvent présenter des incorrections mais, si nous les jugeons acceptables, nous pouvons nous dispenser de mesurer leur reproduction sur la surface plane engendrée.

Reportons nous à ce sujet à la figure 10 :

Dans le cas **a**, si l'arête coupante est rectiligne, la vérification se limitera à celle des diagonales **AD** et **CB à l'aide de la règle.**

Dans le cas **b** si la trajectoire **AO** est rectiligne, la vérification se limitera à la droite **AB à l'aide de la règle.**

Dans le cas **c**, si la trajectoire est rectiligne, la vérification se limitera aux diagonales **AD** et **CB à l'aide de la règle.**

Cas de la génération du plan par finition manuelle.

Dans ce cas, qu'il s'agisse d'un travail à la lime ou au grattoir, il faudra obligatoirement contrôler toute l'aire de la surface parce que les éléments générateurs n'ont pas des trajectoires géométriquement définies. Les trois méthodes précédentes pourront convenir indifféremment : **règle, niveau ou marbre.**

Cas du plan qui servira de référence.

C'est le cas des instruments de contrôle eux-mêmes, des surfaces de guidage des machines-outils, de certaines surfaces d'étanchéité sans adjonction de joint (tiroirs plans de distribution par exemple). Il faudra obligatoirement contrôler toute l'aire de la surface et même rechercher la coïncidence totale avec le plan parfait. La 2e et la 3e méthode

donneront seules des résultats utiles : **niveau, règle optique, marbre, plan, étalon en verre,** utilisés séparément pour les petites surfaces et combinés pour les grandes.

PROCÉDÉS DE VÉRIFICATION DES SURFACES PLANES

Les procédés de vérification nécessitent un matériel coûteux et complet et un temps relativement long lorsqu'ils ont pour but la mesure des défauts de la surface plane. Or, nous venons de voir que, dans la plupart des cas, nous n'aurons pas de mesure à effectuer. Nous mettrons donc en avant, dans l'étude qui suit, les procédés d'atelier les plus courants.

I. — VÉRIFICATION SANS MESURE

A. VÉRIFICATION AU MARBRE

1° Pratique de la vérification au marbre.

On commence toujours par déceler *le gauche* de la surface à contrôler. S'il existe, on recherche l'appui par pesée de la main de façon à maintenir le contact sans basculement. Cette pesée de la main ne doit en aucun cas provoquer la déformation de la pièce lorsqu'elle est mince.

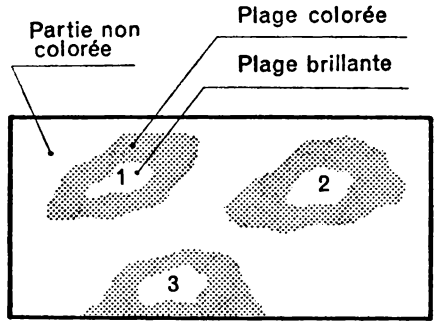


Fig. 11 : Observation d'une surface passée au marbre. Les plages 1, 2 & 3 sont dans le même plan

Déposer sur le marbre une très faible couche de colorant et l'étendre très régulièrement. Les dépôts massifs constituent des points d'appui qui provoquent le basculement désordonné.

Faire glisser la pièce sur le marbre pour marquer le contact des surfaces planes. On le localise par les surfaces brillantes situées dans la zone qui se charge de colorant (fig. 11, plages 1, 2 et 3). Après retouche on recommence l'opération.

La surface est considérée comme plane lorsque les plages brillantes intéressent toute la surface de la pièce et ne laissent entre elles qu'un espace inférieur à celui qu'elles couvrent.

Pour conserver au marbre sa précision et éviter les usures locales, il faut l'utiliser sur toute son étendue.

Lorsque la manipulation de la pièce est rendue impossible par son encombrement ou par son poids

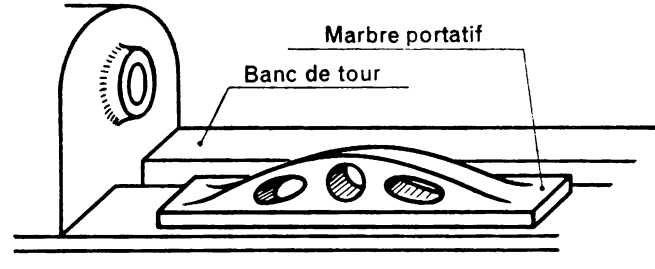


Fig. 12 : Le marbre portatif, très nervuré, est appliqué sur la pièce à contrôler

(bâtis de machines), c'est le marbre qu'on fait glisser sur elle en le manipulant avec précaution.

2° Calage du marbre.

Les marbres courants à quatre pieds d'appui non réglables ne reposent jamais parfaitement sur l'établi qui les reçoit (fig. 13). Trois pieds sont en contact avec le support et le quatrième s'en trouve plus ou moins écarté suivant la charge reçue par le marbre. Cette instabilité constitue un grave inconvénient car il faut avoir recours, pour le calage correct, à un instrument auxiliaire, le niveau en général.

Pour éviter cet inconvénient, on peut adopter le système « Kelvin », qui comporte trois appuis : 1 point, 1 ligne et 1 plan (fig. 14).

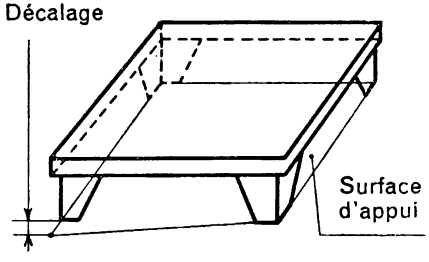


Fig. 13: Trois pieds seulement sont en contact avec l'appui. Le marbre « boite », il fléchit sous son propre poids

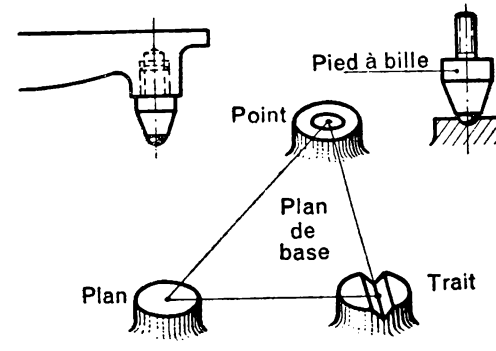


Fig. 14: Suspension « Point - trait - plan » de Kelvin

Le marbre possède trois pieds constitués par des vérins à bille. Le socle, qui doit évidemment être très rigide et lui-même parfaitement calé, porte une fraisure conique à 120°, une rainure en vé disposée radialement par rapport au cône et un plan. Le 1er pied du marbre se centre dans la fraisure, le 2e ne peut que glisser longitudinalement dans la rainure en vé et le 3e ne peut que glisser sur le plan. Le marbre ne peut donc subir aucune déformation de la part des appuis et il n'y a aucune vérification du calage à faire, sauf cependant pour obtenir, le cas échéant, l'horizontalité parfaite. Mais, la déformation de la table du marbre peut toujours être provoquée par son propre poids ou par la charge occasionnelle.

3° Qualités et défauts du marbre.

Le marbre présente une grande surface plane sur laquelle on trouvera toujours l'appui le plus commode. **C'est le seul instrument qui permette de déceler instantanément** *le gauche* **de la surface vérifiée,** défaut caractéristique de l'appui qui boite. De plus, **le marbre permet le contrôle de toute l'étendue de la surface plane en une seule manipulation et il laisse la trace du résultat.**

Mais, le marbre étant généralement de grandes dimensions par rapport à sa hauteur, son poids occasionne des déformations sensibles de sa surface. Ces déformations seront amplifiées d'une manière désordonnée par la charge occasionnelle (pièce à vérifier) qu'il recevra.

De plus, tout déplacement du marbre s'accompagnera d'un déplacement systématique de son incorrection.

B. VÉRIFICATION A LA RÈGLE

1° Pratique de la vérification à la règle.

La règle étant posée par son arête sur la surface à contrôler, il faut éviter de peser en son milieu pour ne pas accentuer sa flexion. La filtration de la lumière entre la règle et la surface à contrôler marque la présence d'un creux (fig. 15).

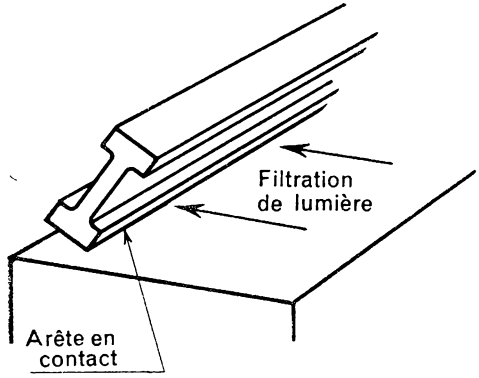


Fig. 15: La filtration de la lumière marque la présence des creux

La vérification à la règle est surtout réservée aux surfaces planes obtenues par façonnage à l'outil. Il suffit donc, comme nous l'avons vu page 17, de vérifier suivant deux directions concourantes (diagonales en principe).

La précision d'une règle rigide est très grande car la lumière filtre par des décollements très faibles mais, en cas d'imperfection de la surface, la localisation du creux n'est pas matérialisée. Quand on enlève la règle, on perd en effet sa trace. De plus, la règle ne décèle pas des zones incorrectes mais seulement des directions.

Pour obtenir le maximum de précision du contrôle, il faut évidemment utiliser une règle plus longue que la surface à contrôler et pour éviter la détérioration de l'arête, il faut la poser sur la surface et non la faire glisser.

2° Qualités et défauts des règles.

Leur grande légèreté et leur faible encombrement en font des instruments de vérification extrêmement commodes.

Cependant, leur légèreté est la cause de leur manque de rigidité et les règles longues sont sujettes à des déformations par flexion qui détruisent entièrement leur précision.

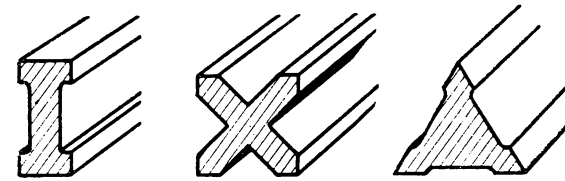


Fig. 16: Diverses sections de règles

On a essayé d'allier la rigidité, le maintien de la précision et la légèreté en adoptant des sections prismatiques évidées (fig. 16) et en utilisant pour leur fabrication des aciers trempés et stabilisés, puis rectifiés et parfois rodés.

Il faut en effet que les arêtes qui constituent les droites de référence soient dépourvues de bavures et très légèrement arrondies par rodage.

La règle ne permet pas l'exploration immédiate de toute l'étendue de la surface plane et elle ne laisse pas trace de la position de l'imperfection.

C. VÉRIFICATION DE PRÉCISION - MÉTHODE DES TROIS MARBRES

Lorsque trois surfaces coïncident parfaitement deux à deux, ce sont des surfaces planes (fig. 17).

Par suite, on obtiendra trois surfaces planes en les ajustant les unes sur les autres deux à deux. C'est ainsi qu'on procédera pour finir les marbres de précision dont la planéité servira de référence au contrôle d'autres surfaces planes.

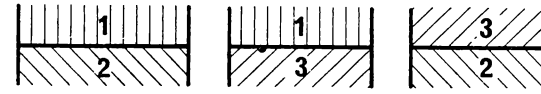


Fig. 17: Les surfaces 1, 2 & 3, coïncidant deux à deux, sont planes

Exposé de la méthode.

Prélevons 3 marbres obtenus par rabotage dans les mêmes conditions. Ils présentent sensiblement le même défaut : bombement par exemple, correspondant à une incorrection initiale **e**.

Repérons ces marbres en les numérotant 1, 2 et 3 (fig. 18). Par grattage, ajustons l'un sur l'autre les marbres 1 et 2 en nous attachant à enlever la même quantité de matière sur chacun d'eux, ce qui atténue leur imperfection qui devient $\mathbf{e'} < \mathbf{e}$.

Sur le marbre 1, **qui sert de référence,** ajustons le marbre 3. Les marbres 2 et 3 sont alors identiques. Posés l'un sur l'autre ils peuvent présenter des incorrections contraires aux incorrections initiales et leur écartement est double de l'incorrection du marbre 1. Ajustons les marbres 2 et 3 l'un sur l'autre, en nous attachant toujours à enlever la même quantité de matière sur chacun d'eux, ce qui atténue encore leur imperfection qui devient $\mathbf{e''} < \mathbf{e'} < \mathbf{e}$.

Sur le marbre 2, **qui sert de référence,** ajustons le marbre 1. Les marbres 1 et 3 sont alors identiques. Ajustons les marbres 1 et 3 l'un sur l'autre. Leur imperfection devient $\mathbf{e'''} < \mathbf{e''} < \mathbf{e'} < \mathbf{e}$.

Sur le marbre 3, qui sert de référence, ajustons de nouveau le marbre 2 qui devient identique au marbre 1, de sorte que tous les trois présentent alors le même défaut de planéité $\mathbf{e'''}$.

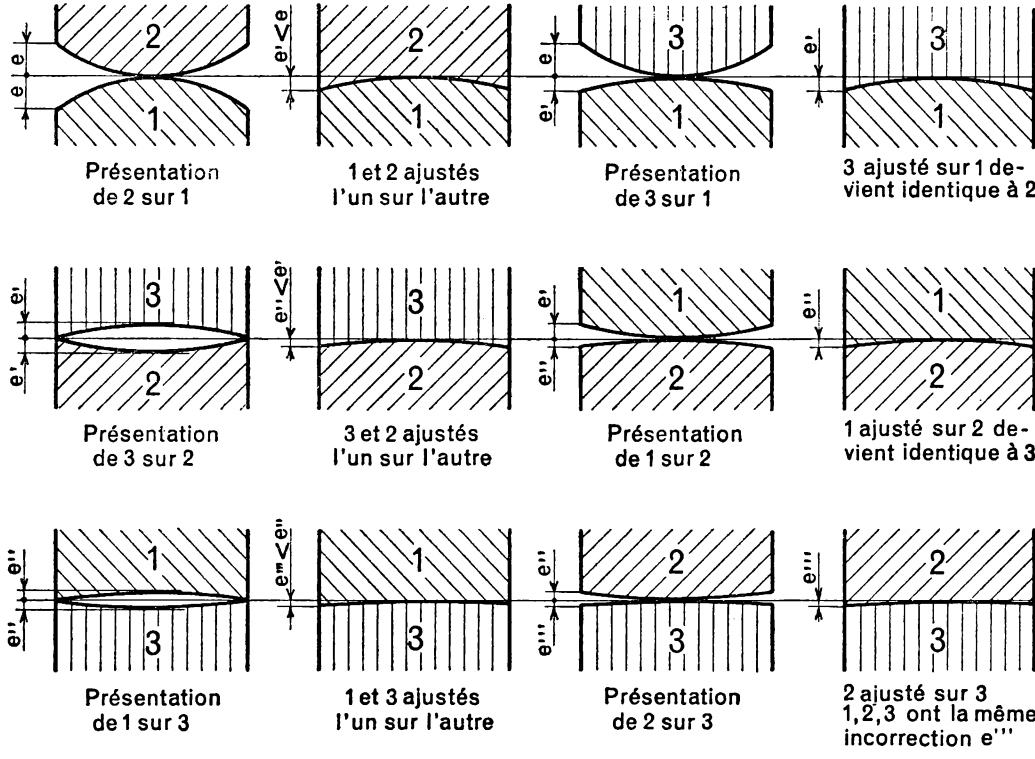


Fig. 18 : Phases explicatives du principe de l'obtention du plan par la méthode des trois marbres. Les imperfections e, e', e'', e''' sont de plus en plus réduites.

En continuant ainsi dans le même ordre on s'approchera du plan parfait autant qu'on le désirera (1).

Le grattage peut être complété par un rodage très fin en suivant le même cycle d'opérations. Mais cette finition demande une grande habileté car elle nécessite des déplacements de faible course, des temps de rodage courts et des vérifications fréquentes

II. — MESURE DES DÉFAUTS MACROGÉOMÉTRIQUES DU PLAN

Les procédés précédemment étudiés permettent de localiser les défauts mais ils ne donnent pas leur valeur. Or, lorsque des tolérances de planéité sont imposées, il faut pouvoir mesurer l'imperfection pour classer la surface comme acceptable ou non accep-

(1) En réalité, les difficultés de réalisation des retouches, le fléchissement des marbres sous leur propre poids et la lenteur de l'opération ne permettent pas de descendre au-dessous d'une erreur résiduelle d'autant plus importante que la surface est plus étendue.

table. Il en est ainsi pour les machines-outils, en particulier, pour lesquelles les **normes dites Salmon** (1) fixent des limites aux incorrections de planéité ou de rectitude. Pour une table de fraiseuse, par exemple, la tolérance est de 40 microns par mètre.

A. MESURE A LA RÈGLE (2)

1° A l'aide d'une cale d'épaisseur.

La règle de dressage, qui peut être assimilée à une droite en raison de sa faible largeur et dont la nervure de renfort limite la déformation, sert de référence. La méthode consiste à mesurer la distance du plan de la règle au plan de la surface à contrôler.

La règle étant posée sur deux cales de même hauteur, **A** et **B** (fig. 19), la cale mobile de hauteur variable **M** est composée de telle sorte qu'elle s'adapte à la hauteur entre la règle et la surface au point **P** considéré. La différence de hauteur entre **M** et **A** et **B** mesure l'imperfection de la surface à contrôler.

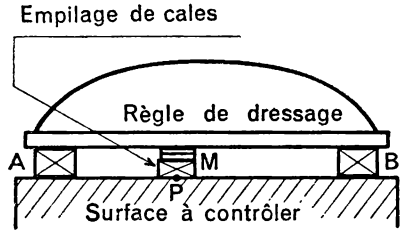


Fig.19: Schéma de principe de mesure des défauts de planéité à la cale

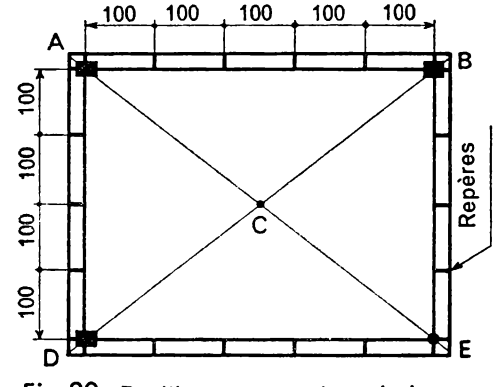


Fig.20: Positions successives de la règle

Pratiquement, on se contente de mesurer cet écart en des points situés aux sommets de carrés de 100 mm de côté repérés sur les bords de la surface (fig. 20) et on admet qu'entre deux points l'écart varie proportionnellement à la distance. S'il passe de — 5 μ à — 10 μ pour 100 *mm* de distance, on admet donc que la variation entre les points considérés est de 1 μ pour 20 *mm*.

La mesure ne pouvant se faire qu'à partir d'un plan fictif sur lequel reposera la règle, on définit ce plan par 3 de ses points **A, B** et **D** par exemple (fig. 20).

---

(1) Normes de réception des machines-outils, établies par P. Salmon, ingénieur général des fabrications d'armement. Editions « Société des Publications Mécaniques », 15, rue Bleue, Paris (9e).

(2) Revoir à ce sujet la 8e leçon de notre ouvrage « Technologie générale Professionnelle » classe de 3e.

Exécution et relevé des mesures (fig. 21).

Mesurer les écarts de 100 en 100 *mm* suivant **AB** et les noter sur un papier quadrillé qui représente la surface à contrôler. Opérer de même suivant **A D** puis suivant **D B** et noter l'écart au centre **C** de la surface.

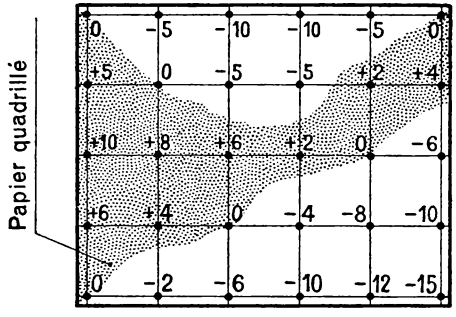


Fig. 21: Relevé des écarts en microns & topographie de la surface

Poser en **C** une cale de hauteur égale à la mesure en ce point et noter l'écart en **E.** Placer en **E** une cale de hauteur égale à la mesure en ce point et poser la règle suivant **D E** puis **B E** en notant les écarts. Opérer de même pour les directions intermédiaires longitudinalement et transversalement pour confirmer les lectures ou en établir la moyenne en cas de faible variation.

La carte des écarts donne la topographie de la surface. La ligne des écarts nuls est tracée par proportionnalité entre deux points. Elle délimite la zone située au-dessus du plan de référence **A B D.**

Critique du procédé.

Ce procédé est précis, à condition que la règle ne subisse pas de déformation, mais il est lent et peu commode.

Pour éviter les écarts dus à la déformation de la surface à contrôler, il y a intérêt à la vérifier posée sur son support habituel.

2° A l'aide du comparateur.

On gagne un temps considérable en remplaçant la cale mobile précédente par un comparateur de précision (fig. 22). Le mode opératoire est exactement le même et les résultats sont obtenus sous la même forme.

Pour obtenir le maximum de précision du comparateur, il faut le glisser sous la règle toujours dans le même sens (le changement de direction ou de sens provoque une variation des résistances qui freinent le palpeur et, par suite, de la position de lecture de l'aiguille), le monter sur un support à 3 points d'appui, et l'étalonner au voisinage d'une des cales qui portent la règle.

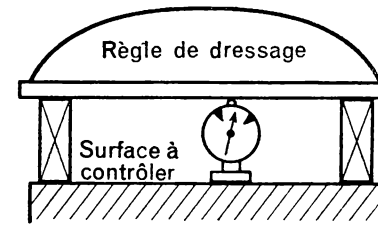


Fig. 22: Schéma de principe de mesure des défauts de planéité au comparateur

B. MESURE AU NIVEAU A BULLE (1) (2)

Mesure de la dénivellation.

Le niveau à bulle (fig. 23) est un appareil amplificateur de mesure. En effet, si nous le réduisons à la fiole de longueur **L** et de rayon **R** posée sur une dénivellation (fig. 24) nous pouvons écrire : $\frac{h}{l} = \frac{L}{R}$ (triangles semblables **a b d** et **o' e c**) d'où $l = h \times \frac{R}{L}$.

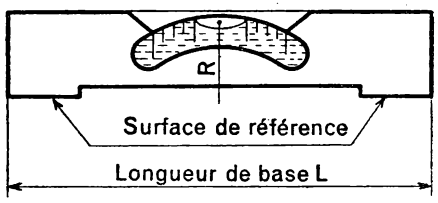


Fig. 23: Caractéristiques d'un niveau à bulle

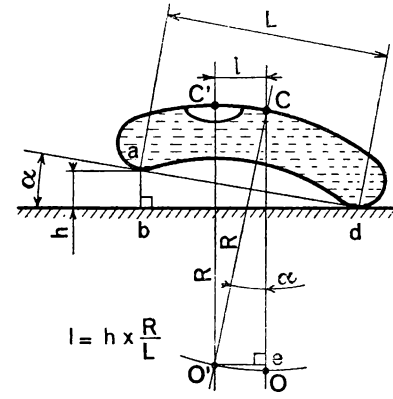


Fig. 24: Le niveau est un amplificateur de mesure

Cette relation montre que le déplacement de la bulle, pour une même dénivellation **h**, est fonction du rapport $\frac{R}{L}$ qui marquera donc l'amplification du niveau.

Si **R** = 60 *m* et **L** = 200 *mm* par exemple, $\frac{R}{L} = \frac{60}{0{,}2} = 300$ et **l** = 300 **h**, l'amplification est de 300.

Chaque division du niveau indiquant une pente en microns par mètre connue, soit par exemple 50 $\mu/_m$ pour une portée **L** presque toujours égale à 20 *cm*, cette division de la fiole indiquera $50 \times \frac{20}{100} = 10$ μ de dénivellation.

Exécution et relevé des mesures.

— Mettre la surface de niveau sur trois de ses points ou sur son support habituel si elle est importante ;

— Tracer sur la surface un quadrillage de côté **L** — 10 *mm*, soit 190 *mm*, afin d'assurer le recouvrement des positions du niveau ;

(1) D'après les études de l'abbé Cayère, Ingénieur A et M.
(2) Revoir à ce sujet la 8e leçon de notre ouvrage Technologie Professionnelle, classe de 3e.

- Porter sur un papier quadrillé les dénivellations en microns soit (fig. 25, vue de dessus) : + 5 μ de **a** à **e**, + 5 μ de **e** à **f**, — 15 μ de **f** à **g**, + 5 μ de **g** à **b**;
- Relever les altitudes des différents points par rapport à **a** (fig. 25 coupe **ab**) soit : 0 pour **a**, + 5 pour **e**, + 10 pour **f**, — 5 pour **g** et 0 pour **b**;
— Opérer de même suivant **bd** (fig. 26) puis **ac** et **cd**. Le contrôle des mesures est donné par l'identité d'altitude du point **d**;
— Explorer ensuite toute la surface suivant les lignes transversales intermédiaires et définir les altitudes des différents points par rapport au point **a** qui a l'altitude zéro;
— Dresser la carte initiale des altitudes (fig. 26).

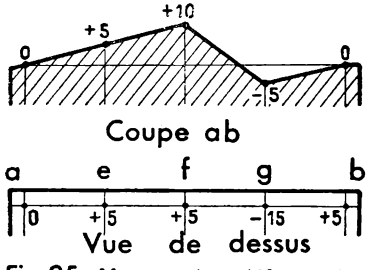


Fig.25: Mesure des défauts de planéité au niveau et relevé des altitudes

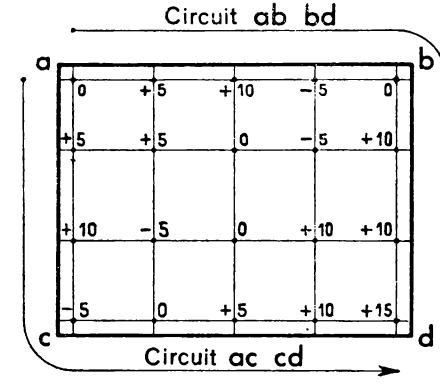


Fig.26: Relevé des altitudes après vérification au niveau

Causes d'erreurs de mesure.

La précision d'une mesure peut être très affectée par les erreurs de parallaxe (fig. 27) ou par les variations de température du fait que verre et liquide n'ont pas le même coefficient de dilatation (fig. 28).

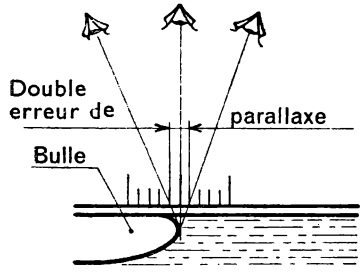


Fig.27: Une mauvaise visée à l'œil nu cause une erreur de parallaxe

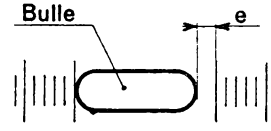


Fig.28: L'écart e provient des dilatations différentes du verre et du liquide

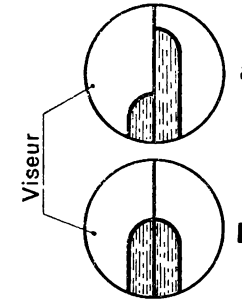


Fig.29: Images des demi-extrémités de la bulle

Certains niveaux de précision sont munis d'une lunette de visée destinée à supprimer les erreurs de parallaxe. D'autres (le niveau Huet) sont complétés par un système optique constitué par deux prismes qui font apparaître dans le viseur les deux demi-extrémités de la bulle côte à côte (fig. 29 a). Un écart de la bulle se révèle ainsi en double grandeur. A l'aide d'un tambour micrométrique on amène les demi-images à se compléter (fig. 29 b). La lecture de l'inclinaison, en centièmes de millième (1) se fait sur le tambour aussi aisément que sur un micromètre.

La mesure au niveau présente surtout de l'intérêt pour la contrôle par mesure des défauts des surfaces d'assez grande étendue et de dimensions (longueur et largeur) comparables, tables des machines-outils par exemple.

C. MESURE A LA RÈGLE OPTIQUE

Les appareils optiques présentent une parfaite fidélité et assurent une précision de lecture atteignant le micron. Nous n'étudierons qu'un seul de ces appareils : la règle optique Huet (fig. 30). Le palpeur, qui s'appuie sur la surface à contrôler, est solidaire d'un trait repère **K**, gravé sur une plaque de verre, et d'un double prisme **D**, dont les surfaces de joint forment miroir **M** à 45°. Une lampe **L** projette sur la face inférieure du miroir un faisceau de lumière parallèle à l'axe vertical. L'ombre du trait repère **K** est donc projetée horizontalement vers la droite. Une lentille $\mathbf{O_1}$ et un prisme $\mathbf{R_1}$ renvoient cette ombre vers la lentille $\mathbf{O_2}$ et le prisme $\mathbf{R_2}$, de sorte qu'elle revient frapper la face supérieure du miroir **M**. Une lunette permet l'observation du miroir **M**.

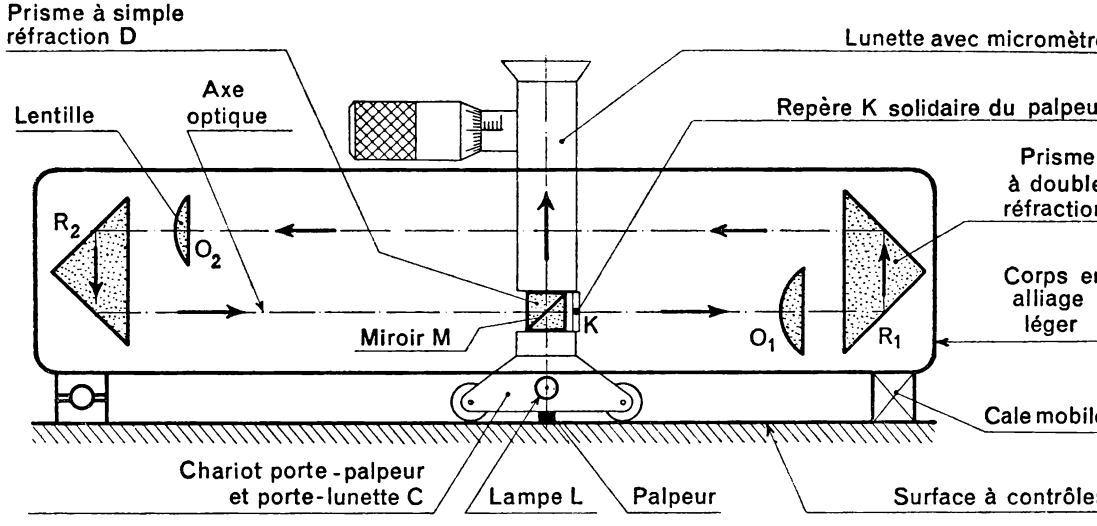


Fig. 30 : Schéma simplifié de la règle optique « Huet »

(1) Le *millième* est l'angle sous lequel on voit 1 *m* à 1 000 *m* de distance ou encore 1 *mm* à 1 *m*. Les angles mesurés par le niveau étant très petits on peut considérer que leur grandeur en *millièmes*, leur sinus et leur tangente ont même valeur.

Principe de la mesure.

Le corps de l'appareil, en alliage léger, porte les lentilles O_1 O_2 et les prismes R_1 R_2 à ses extrémités. Un chariot **C** qui porte le palpeur, le miroir **M** et le repère **K**, ainsi que la lunette, se déplace sur le corps de l'appareil, le long de la surface à contrôler sur laquelle le palpeur s'appuie librement.

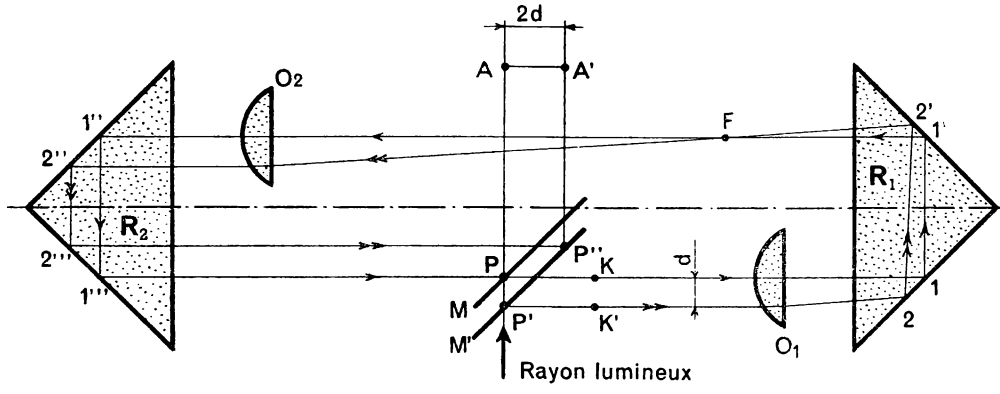


Fig. 31: Principe de fonctionnement de la règle optique « Huet »

Le schéma (fig. 31) montre la marche du rayon lumineux.

Lorsque le palpeur place le point **P** correspondant du miroir **M** sur l'axe optique de la lentille O_1, l'ombre du repère **K** suit le chemin 1-1'-1''-1''', passant par l'axe optique de la lentille O_2 et revient en **P** sur la face supérieure du miroir. L'opérateur voit cette image en **A** qui correspond au zéro de la graduation micrométrique de l'oculaire.

Lorsque le palpeur, dans son déplacement vertical par rapport aux lentilles O_1 et O_2, place le miroir en **M'**, le rayon lumineux se réfléchit en **P'** et le repère **K** est en **K'** dont l'ombre suit le chemin 2-2'-2''-2''', par déviation dans les lentilles O_1 et O_2 vers leur foyer commun **F** (foyer image pour O_1, foyer objet pour O_2). Cette ombre revient en **P''** sur le miroir **M'** et l'opérateur en voit l'image en **A'** décalé de **A A'** par rapport au zéro. La distance **A A'** vue par l'opérateur, double du déplacement du palpeur, peut donc mesurer ce déplacement.

Règlage et grossissement de l'appareil.

Le corps s'appuie sur la surface à contrôler par deux cales (fig. 30) dont l'une est réglable en épaisseur de façon à obtenir la même lecture, zéro de référence, lorsque le palpeur est aux deux extrémités de l'appareil. L'axe optique est alors parallèle au plan d'appui des cales.

Le déplacement vertical du palpeur étant $\mathbf{P}\,\mathbf{P}' = \mathbf{d}$, le cheminement des rayons montre que la distance verticale entre $\mathbf{P}'$ et $\mathbf{P}''$ sera égale à 2 **d** et que, par suite, $\mathbf{A}\,\mathbf{A}' = 2\,\mathbf{d}$. Cette amplification, combinée au grossissement de la lunette qui est elle-même un microscope, permet de lire une dénivellation de 1 micron.

Utilisation de l'appareil.

Le relevé des mesures se fait comme pour la règle et la cale (voir paragraphe A 1°).

La règle optique présente une droite de référence pratiquement indéformable puisqu'elle se confond avec le rayon lumineux correspondant à l'axe optique. De plus aucun appareil de mesure annexe ne vient ajouter son erreur propre à la lecture de la dénivellation. On utilisera donc la règle optique pour toutes les vérifications de précision : marbres, règles de dressage, glissières, bancs et tables de machines-outils.

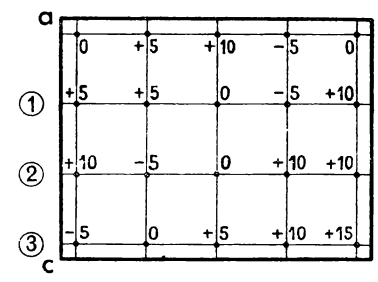


Fig.32: Relevé des altitudes après vérification au niveau

D. EXPLOITATION DES MESURES EN VUE DE LA RETOUCHE PAR GRATTAGE DE LA SURFACE

Pour justifier cette opération reprenons (fig. 32) le relevé des altitudes décelées par la mesure au niveau à bulle.

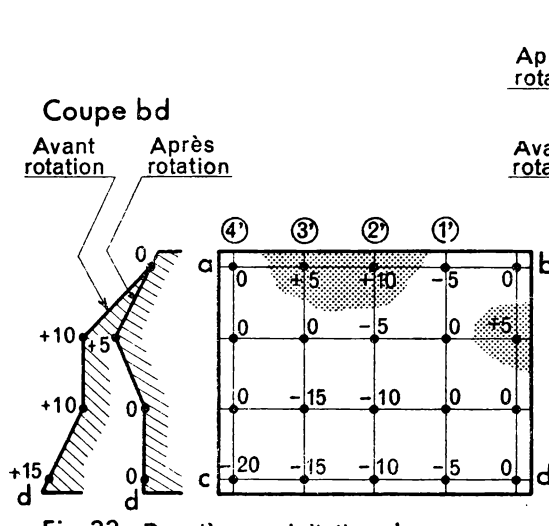


Fig.33: Première exploitation de mesure des défauts de planéité

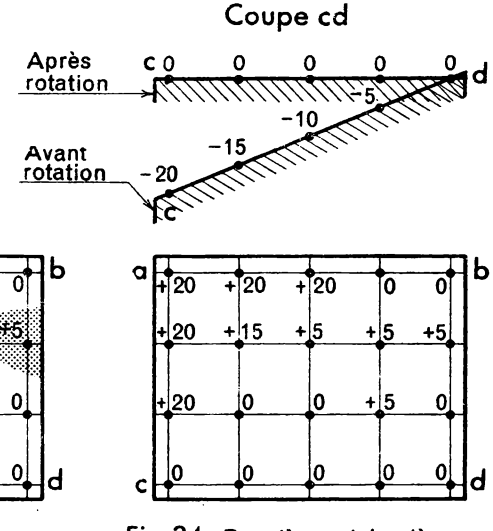


Fig.34: Deuxième et dernière exploitation de la mesure des défauts

La carte de la figure 32 présente des altitudes positives et des altitudes négatives. La lecture du relief est pénible et les régions à gratter apparaissent mal. Il faut donc éliminer les altitudes négatives mais de telle sorte que la quantité de matière à gratter soit aussi réduite que possible. Un procédé rapide consiste à faire tourner la surface autour de deux de ses bords pour relever le point le plus bas.

Ex : Les points **a** et **b** (fig. 32) sont à l'altitude zéro ; en faisant tourner la surface autour de **a b**, nous pourrons amener le point **d** dans le plan zéro. Mais tous les points de la ligne 3 descendront de 15 μ alors que ceux de la ligne 2 descendront de $15 \times \frac{2}{3} = 10\ \mu$ et ceux de la ligne 1 de $15 \times \frac{1}{3} = 5\ \mu$. La nouvelle carte de la surface est donnée par la figure 33 et le point le plus bas est **C** à — 20 μ.

En faisant tourner la surface autour de **b d** et en ramenant **C** dans le plan zéro tous les pointes de la ligne 4′ monteront de 20 μ ceux de la ligne 3′ de $20 \times \frac{3}{4} = 15\ \mu$ ceux de la ligne 2′ de $20 \times \frac{2}{4} = 10\ \mu$ et ceux de la ligne 1′ de $20 \times \frac{1}{4} = 5\ \mu$.

La nouvelle carte de la surface (fig. 34) ne présente plus d'altitudes négatives ; les parties en relief qu'il faudra gratter sont très apparentes.

REMARQUES. — 1° Les pivotements imaginaires peuvent se faire aussi bien autour des lignes intermédiaires qu'autour des lignes extrêmes. C'est l'allure des dénivellations qui détermine le choix.

2° En apparence la figure 34 ne présente pas le même relief que la figure 32 d'origine. Les deux pivotements ont modifié les altitudes de tous les points par rapport au plan horizontal zéro. D'autres pivotements auraient donné une configuration différente de la surface. Cependant la surface elle-même n'a pas changé et les bosses occupent une position invariable par rapport à ses bords.

Vérification des surfaces cylindriques

Nous nous limiterons à la surface cylindrique à section droite circulaire.

Nous rappelons que, dans ce cas, la génératrice est généralement une droite qui s'appuie sur le cercle directeur en restant parallèle à elle-même et normale au plan du cercle. Mais la génératrice peut également être le cercle et la directrice est alors la droite (brochage par exemple).

OPPORTUNITÉ DE LA VÉRIFICATION

A. GÉNÉRATION DE LA SURFACE CYLINDRIQUE

La surface cylindrique est généralement obtenue par la combinaison de mouvements comme l'illustre la figure 35.

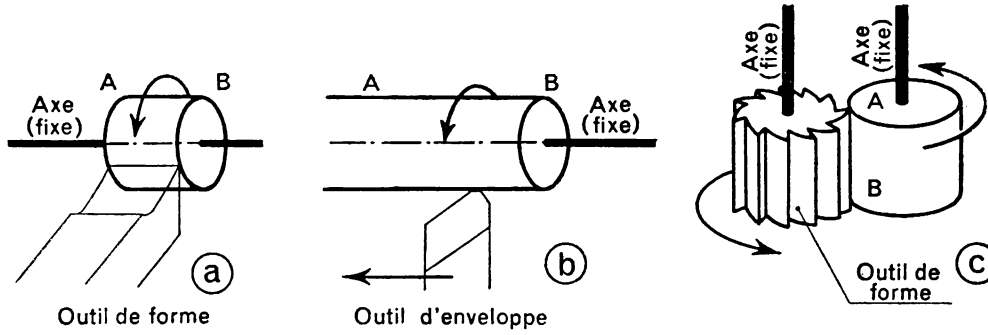


Fig. 35: Méthodes courantes de génération d'une surface cylindrique :
a) par un mouvement circulaire
b) par un mouvement circulaire & un mouvement rectiligne
c) par deux mouvements circulaires

En **a** et **c** la génératrice est l'arête rectiligne de l'outil de forme ;

En **b** la génératrice est le cercle dû au mouvement circulaire et la directrice est le déplacement rectiligne de l'outil.

B. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

Quel que soit son mode de génération, la surface cylindrique est caractérisée par son axe rectiligne et sa section droite circulaire invariable et centrée sur l'axe.

La correction totale des mouvements générateurs conduirait à la génération d'une surface cylindrique parfaite. Or, il n'en est pratiquement jamais ainsi et les imperfections auront le plus souvent l'une des origines ci-après :

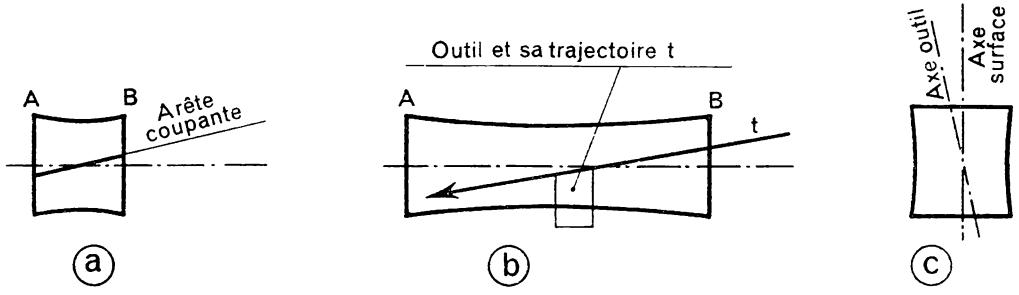


Fig. 36: Causes de défauts dans la génération du cylindre
a) défaut de parallélisme entre arête coupante & axe
b) défaut de parallélisme entre trajectoire de l'outil & axe
c) défaut de parallélisme entre axes outil & surface

— arête de l'outil générateur non parallèle à l'axe de rotation (fig. 36-**a**);
— trajectoire de l'arête de l'outil générateur non parallèle à l'axe de rotation (fig. 36-**b**);
— axe de l'outil générateur non parallèle à l'axe du cylindre à engendrer (fig. 36-**c**);
— axe de rotation matériel du cylindre à engendrer ou position de l'outil non immuables en raison des déformations ou de mauvais maintien.

C. DÉFAUTS DE LA SURFACE CYLINDRIQUE

On peut les résumer sous les formes générales suivantes :

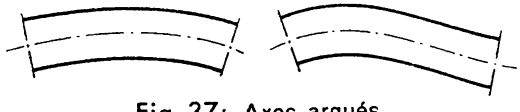


Fig. 37: Axes arqués

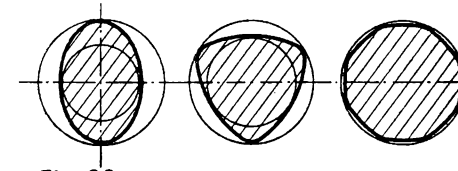


Fig. 38: Section elliptique & sections polygonales

— génératrices non rectilignes consécutives à un défaut de parallélisme entre l'outil générateur et l'axe, ou à des déformations. Dans ce dernier cas, l'axe peut être arqué régulièrement ou d'une manière désordonnée (fig. 37);
— section non circulaire consécutive à un mauvais maintien de l'axe ou de l'outil. Dans ce cas, la section droite a une forme elliptique, ou ovale, ou polygonale (fig. 38);

— génératrices non parallèles à l'axe de la surface. Dans ce cas, le diamètre de la section droite varie et la surface est conique ou à génératrice convexe, concave ou ondulée (fig. 39).

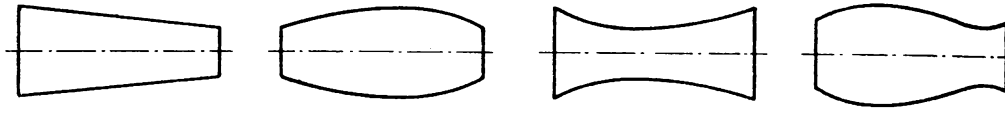


Fig. 39: Génératrices non parallèles à l'axe de la surface

D. ADAPTATION DU CONTROLE

En définitive, le contrôle de la surface cylindrique portera sur la rectitude de la génératrice, la constance du diamètre et la forme circulaire de la section droite.

Fabrication mécanique ordinaire.

1° Cas des surfaces cylindriques de faible longueur par rapport au diamètre.

Si l'outil générateur se déplace parallèlement à l'axe (fig. 35 **b**), le contrôle du diamètre est suffisant.

Dans le cas d'un outil de forme, il faut ajouter au contrôle du diamètre celui de sa constance qui conditionne le parallélisme de l'arête de forme et de l'axe (fig. 35 a et **c**).

2° Cas des surfaces cylindriques de grande longueur par rapport au diamètre.

Il faut alors tenir compte des conditions de maintien de la pièce et de l'outil.

Si la pièce est portée par une lunette à suivre, par exemple, la flexion est évitée et le contrôle du diamètre est suffisant.

Si l'outil sort de son support avec un porte-à-faux croissant, il sera nécessaire de contrôler la constance du diamètre.

Si la pièce est montée en plateau tournant non équilibré, il faudra contrôler à la fois la forme circulaire de la section et la constance du diamètre.

Fabrication mécanique de précision.

Chaque cas particulier recevra la solution en rapport avec l'usage qui sera fait de la surface à contrôler.

Tous les défauts seront généralement détectés et mesurés.

I. — DÉTECTION DES DÉFAUTS

Avant de s'engager dans l'étude détaillée du défaut et dans la mesure de son importance, il est bon de s'assurer que ce défaut existe.

A. PAR PREMIER CONTROLE AU COMPARATEUR (fig. 40).

Lorsque la pièce comporte des centres, on la monte entre pointes et on palpe la génératrice supérieure à l'aide d'un comparateur de précision glissant sur un plan de référence parallèle à l'axe des pointes. La rotation de la pièce, combinée au glissement du palpeur, fait apparaître les imperfections de la surface par le déplacement de l'aiguille du comparateur.

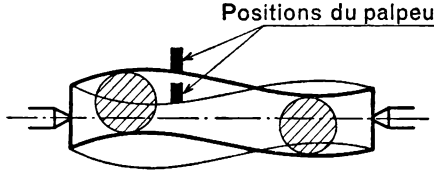


Fig. 40: L'axe arqué peut laisser croire à une section incorrecte

Mais ce procédé ne permet pas de définir et de localiser très exactement les défauts. En effet, le déplacement de l'aiguille peut correspondre aussi bien à un axe arqué avec forme de section correcte (fig. 40) qu'à un axe rectiligne et une forme de section incorrecte (fig. 41).

Il faudra donc, suivant le but recherché et les tolérances imposées, pousser plus loin l'investigation.

B. PAR MESURE DU DIAMÈTRE

La mesure au micromètre peut faire apparaître l'ovalisation ou la forme irrégulière, à l'exception des formes régulières mixtilignes triangulaires ou polygonales (fig. 41 **a** et **b**) qui n'entraînent aucune différence de lecture.

Dans le premier cas (différence de lecture) la vérification doit être poursuivie. Il est difficile dans le deuxième d'être affirmatif.

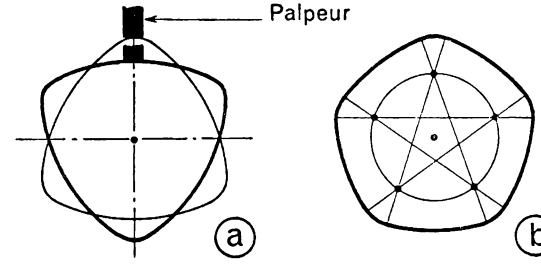


Fig. 41: La forme incorrecte de la section peut laisser croire à un axe arqué

C. PAR MESURE AU MICROMÈTRE ET CONTROLE AU COMPARATEUR

Lorsque le micromètre n'accuse aucune différence de lecture par la mesure du diamètre, le montage entre pointes et le contrôle au comparateur feront apparaître le défaut de forme de la section et de rectitude de l'axe.

Cas d'un défaut de forme de section.

Pour un axe correct (fig. 42 **a**) le comparateur marquera plusieurs fois par tour de pièce les mêmes limites. Pour un axe incorrect (fig. 42 **b**) le comparateur marquera des limites variées et désordonnées.

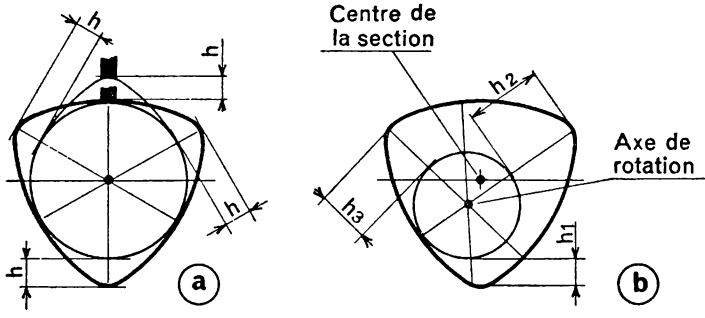


Fig. 42: Formes de sections incorrectes :
a) axe correct - h se reproduit trois fois par tour
b) axe incorrect - h varie

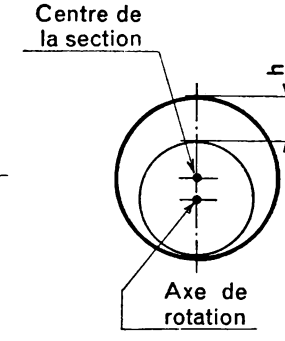


Fig. 43: Forme de section correcte. Axe incorrect, h se reproduit une fois par tour

Cas d'une section correcte.

Pour un axe incorrect (fig. 43) le comparateur marquera une variation une seule fois par tour.

II. — MESURE ET LOCALISATION DES DÉFAUTS

A. MESURE DU DIAMÈTRE

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure du diamètre suffira dans la plupart des cas :

1° Diamètre extérieur.

Mesure directe - On utilise, selon le degré de précision recherché, le pied à coulisse ou le micromètre.

Mesure indirecte - On procède par comparaison avec un étalon.

a) Utilisation du comparateur à cadran.

L'écart réel **e** est obtenu en plaçant la pièce comme l'indique la figure 44. L'étalonnage peut alors se faire sur cales Johansson.

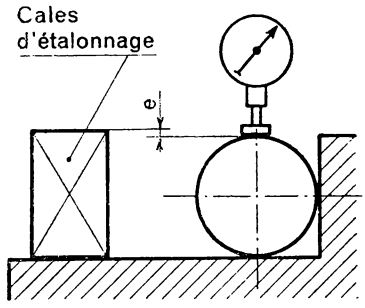


Fig. 44 : Mesure des écarts de diamétre entre deux touches. e = écart réel

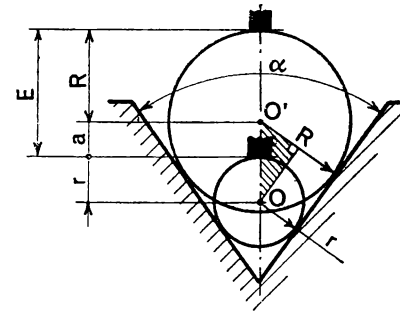


Fig. 45 : Mesure des écarts de diamètre sur vé.

$$\text{Ecart réel} = e = \begin{cases} \frac{2E}{3} \text{ si } \alpha = 60° \\ \frac{E}{1,2} \text{ si } \alpha = 90° \end{cases}$$

On obtient une amplification de la lecture de l'écart en plaçant la pièce sur un vé (fig. 45). L'étalonnage se fait sur un cylindre de référence ou un tampon de vérification.

Soit **E** l'écart de lecture du comparateur et **e** l'écart réel

On a $\mathbf{E} = \mathbf{a} + \mathbf{R}$ et $\mathbf{a} = \overline{\mathbf{00'}} - \mathbf{r}$

D'où $\mathbf{E} = \overline{\mathbf{00'}} + \mathbf{R} - \mathbf{r}$ Mais $\overline{\mathbf{00'}} = \dfrac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$ et par suite

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + (\mathbf{R} - \mathbf{r}) = (\mathbf{R} - \mathbf{r})\left(1 + \sin \frac{\alpha}{2}\right) \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{Donc } (\mathbf{R} - \mathbf{r}) = \frac{\mathbf{E} \sin \frac{\alpha}{2}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}$$

Comme l'écart réel est $\mathbf{e} = \mathbf{D} - \mathbf{d} = 2\,\mathbf{R} - 2\,\mathbf{r} = 2\,(\mathbf{R} - \mathbf{r})$,

on aura $\mathbf{e} = 2\,\mathbf{E} \times \dfrac{\sin \frac{\alpha}{2}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}$

Pour $\alpha = 60°$, $\frac{\alpha}{2} = 30°$ et $\sin \frac{\alpha}{2} = 0,5$

$$\text{d'où } \mathbf{e} = 2 \times \mathbf{E}\,\frac{0,5}{1,5} = \frac{2\mathbf{E}}{3}$$

Le coefficient de correction est donc $\frac{2}{3}$. Pour une lecture $\mathbf{E} = 0{,}03$ *mm*, l'écart réel est $\mathbf{e} = 0{,}03 \times \frac{2}{3} = 0{,}02$ *mm*.

$$\text{Pour } \alpha = 90^{o}, \text{ on trouverait } \mathbf{e} = \frac{\mathbf{E}}{1{,}2}.$$

b) Utilisation du comparateur pneumatique « Solex » équipé du vé de mesure (fig. 46).

Le calcul de la valeur de l'écart réel **e** par rapport à l'écart mesuré **E** se fait comme précédemment.

On a $\mathbf{E} = \mathbf{r} - \mathbf{a}$ et $\mathbf{a} = \mathbf{R} - \overline{\mathbf{00'}}$ d'où $\mathbf{E} = \mathbf{r} - \mathbf{R} + \overline{\mathbf{00'}}$.

Mais $\overline{\mathbf{00'}} = \dfrac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$

et par suite $\mathbf{E} = \dfrac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{\sin \frac{\alpha}{2}} - (\mathbf{R} - \mathbf{r}) =$

$(\mathbf{R} - \mathbf{r}) \quad (1 - \sin \frac{\alpha}{2}) \dfrac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}$

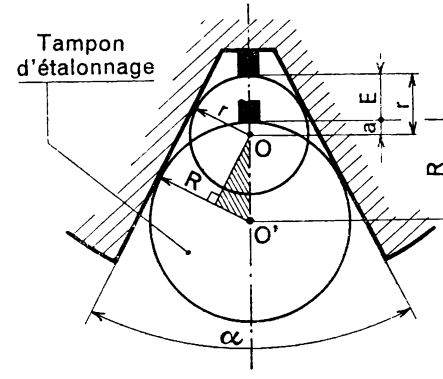


Fig. 46: Mesure du diamètre au vé de mesure « Solex »

$$\text{Donc, } \mathbf{R} - \mathbf{r} = \frac{\mathbf{E} \quad \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{Et en définitive } \mathbf{e} = 2\,(\mathbf{R} - \mathbf{r}) = 2\,\mathbf{E} \times \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{Pour } \alpha = 60^{o} \text{ on a } \mathbf{e} = 2\,\mathbf{E} \times \frac{0{,}5}{1 - 0{,}5} = 2\,\mathbf{E}.$$

L'échelle de lecture du comparateur peut être établie en fonction de la valeur de l'angle du vé, de telle sorte que cette lecture donne directement l'écart réel.

2° Diamètre intérieur.

Mesure directe : On peut utiliser :

— le pied à coulisse qui ne peut atteindre que les extrémités de l'alésage ;
— le micromètre d'intérieur qui n'atteint pas les alésages profonds ;

— la jauge à trois touches à 120° (fig. 47) dont la vis micrométrique commande un noyau conique qui écarte les touches. Des rallonges permettent la mesure des alésages profonds.

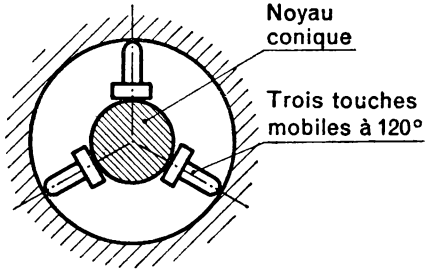


Fig. 47: Jauge à trois touches à 120°

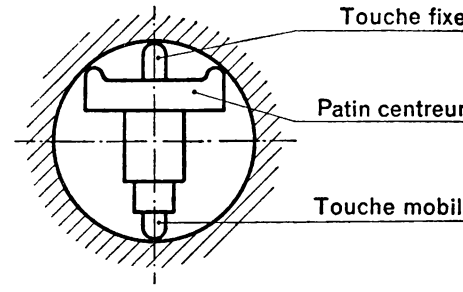


Fig. 48: Jauge à deux touches opposées avec patin centreur

Mesure indirecte : Après étalonnage, on peut utiliser :

— un comparateur à deux touches opposées muni d'un centreur à patin (fig. 48);
— un tampon à gicleurs branché sur le micromètre Solex.

B. MESURE DES DÉFAUTS DE FORME

Si l'écart de diamètre dans une même section reste constant quand on fait tourner la pièce sous le palpeur, c'est qu'il n'y a pas de défaut de forme. On emploiera donc pour mesurer les défauts de forme les procédés de mesure précédents :

— sans restriction pour les cylindres intérieurs;
— en supprimant l'étalonnage pour les cylindres extérieurs.

Il faut cependant remarquer que la mesure du diamètre devant accompagner obligatoirement la mesure du défaut de forme, il sera logique de procéder à ces deux mesures en même temps.

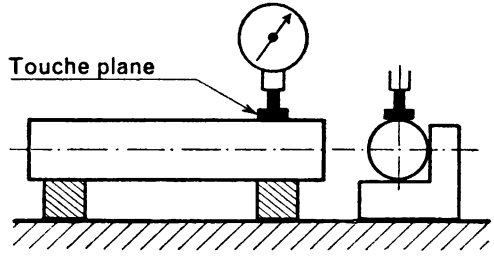


Fig. 49: Contrôle entre deux touches opposées

1° Mesure sur appuis plans (fig. 49).

Le cylindre est posé sur deux appuis identiques en forme d'équerre et buté contre les faces verticales.

La touche plane du comparateur s'appuie sur la génératrice supérieure du cylindre et le *faux rond*, ou défaut de profil est mesuré par la variation de lecture pour un tour de pièce.

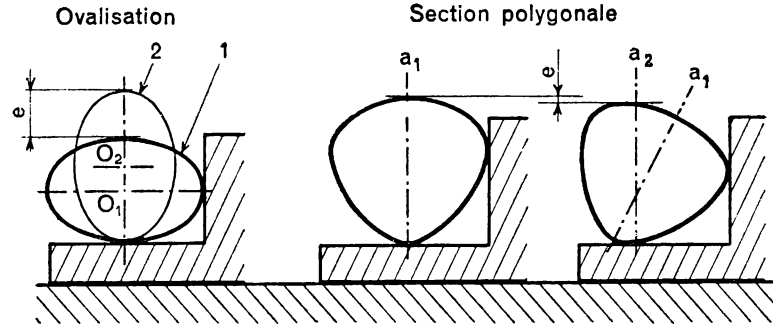


Fig. 50: L'écart e est surtout sensible pour un profil ovalisé

L'ovalisation (fig. 50) donne une variation nettement caractérisée mais la section polygonale ne provoque qu'un trop faible déplacement de l'aiguille.

2° Mesure sur appuis en vé.

Le cylindre est posé sur deux vés identiques et le palpeur du comparateur s'appuie sur la génératrice supérieure du cylindre.

Les écarts dus à une ovalisation (fig. 51) ou à une forme polygonale (fig. 52) sont différents de l'écart réel en raison du déplacement des points d'appui dans le vé.

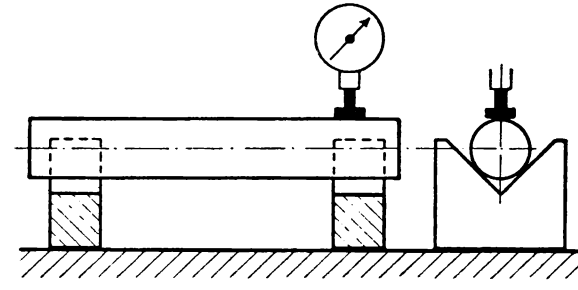


Fig. 51: Contrôle entre trois touches sur vés

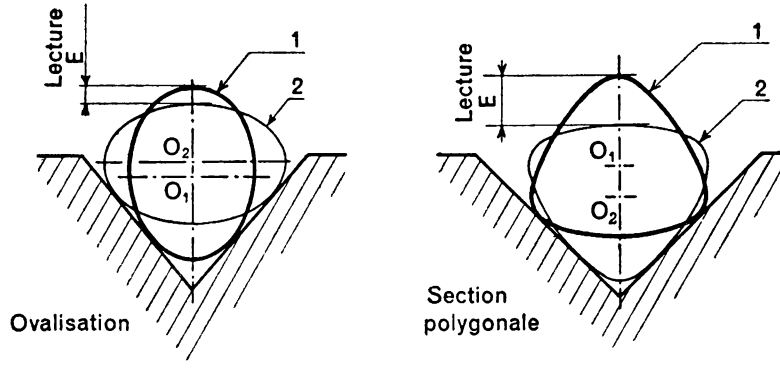


Fig. 52: L' écart lu E est surtout sensible pour un profil polygonal

3° Interprétation des mesures.

Résultats de la mesure sur appuis plans.	Écart	Aucun écart	Aucun écart
Résultats de la mesure sur appuis en vé.	Écart	Écart	Aucun écart
Nature de la section.....	Ovale	Polygonale	Cylindrique

Remarque. — La mesure du diamètre ou la mesure des défauts de forme sont à répéter sur toute la longueur du cylindre car les incorrections sont parfois locales. Ainsi, une pièce tournée entre pointes présente des défauts dus à sa flexion d'autant plus importante qu'on s'éloigne des pointes.

C. CONTROLE DE LA RECTITUDE DE LA GÉNÉRATRICE

La pièce est montée entre pointes ou, à défaut, posée sur deux vés et pressée à chaque extrémité contre une bille par une butée à ressort (fig. 53).

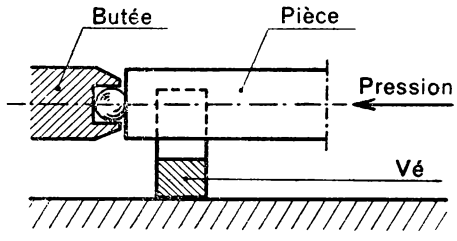


Fig. 53: La butée à bille maintient la pièce en position axiale

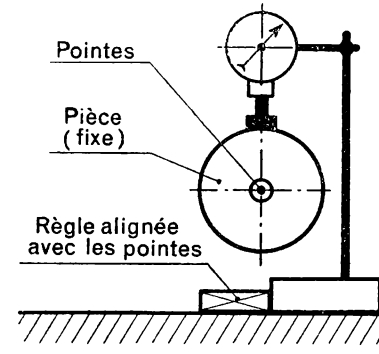


Fig. 54: Vérification de la rectitude de la génératrice

Le palpeur s'appuie sur la génératrice supérieure et le socle du comparateur glisse contre une règle alignée parallèlement aux pointes ou à l'axe des vés. La déviation de l'aiguille marque un défaut de rectitude de la génératrice (fig. 54).

Si la déviation est identique pour toutes les positions de la pièce, c'est qu'il n'y a pas défaut de forme et que l'axe est rectiligne (fig. 52). L'incorrection provient des différences de diamètre (fig. 55).

Si la déviation change de sens pour deux positions opposées de la pièce, il peut y avoir défaut de rectitude de l'axe (fig. 56) ou défaut de forme.

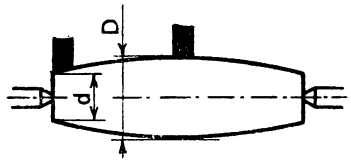


Fig. 55 : Défaut de rectitude de la génératrice seule

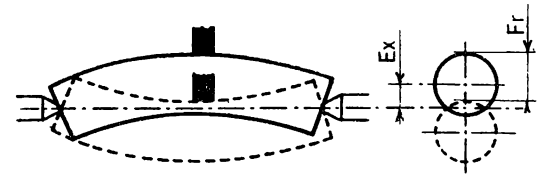


Fig. 56 : Défaut de la rectitude de l'axe & de la génératrice. Ex: excentricité. Fr: Faux - rond

D. CONTROLE DE LA PERPENDICULARITÉ DE LA GÉNÉRATRICE ET DU CERCLE DIRECTEUR

Tout défaut de rectitude de l'axe entraîne un défaut de forme qui prend le nom de **voilage.** On peut le faire apparaître en plaçant le palpeur du comparateur contre une des faces planes du cylindre (fig. 57).

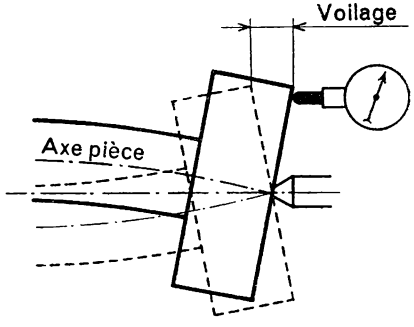


Fig. 57 : Voilage lié à un défaut de rectitude de l'axe

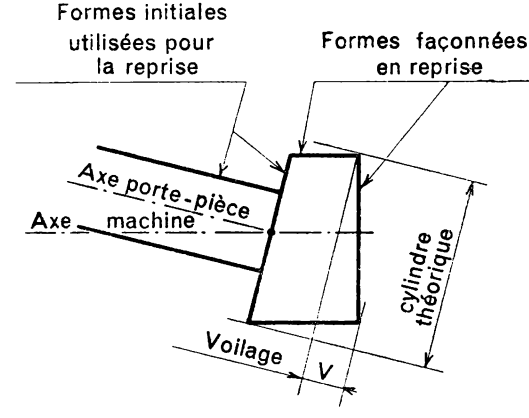


Fig. 58 : Voilage lié à un mauvais positionnement de la pièce pour la reprise de l'extrémité

Un positionnement défectueux de la pièce dans le porte-pièce, en cas de reprise en mandrin ou en pince, occasionne un mauvais alignement de la forme cylindrique obtenue par rapport à l'axe général de la pièce (fig. 58).

III. — CONTROLE DE LA CORRECTION FONCTIONNELLE D'UN AJUSTEMENT CYLINDRIQUE

L'ajustement est défini par les tolérances de fabrication et le contrôle s'applique surtout aux dimensions car, en production suivie, on ne saurait s'astreindre à opérer toutes les vérifications de forme dont nous avons parlé.

Il importe donc de choisir les instruments de contrôle de telle sorte que les défauts de forme interviennent dans l'appréciation des écarts.

A. CONTROLE AU TAMPON ET A LA BAGUE

1° Influence de l'ovalisation.

Pour un alésage ovale, le contrôle aux tampons maxi et mini se révèle inefficace parce que la cote maxi peut se trouver légèrement dépassée sans que le tampon maxi s'engage dans l'alésage (fig. 59).

Il en est de même pour un arbre ovale sur lequel la bague mini ne pourra pas glisser.

Dans l'un et l'autre cas, l'usure de fonctionnement sera rapide en raison du manque de matière dû à l'ovalisation, et un emmanchement forcé (frettage) ainsi réalisé ne tiendra pas.

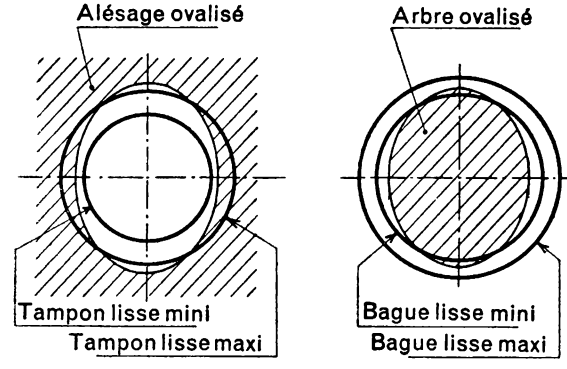


Fig. 59 : Les pièces sont jugées acceptables malgré le net dépassement des cotes limites

2° Influence de l'ondulation de la génératrice.

L'examen de la figure 60 montre que le contrôle à l'aide des tampons maxi et mini n'est pas probant. Il peut se trouver des zones hors tolérances que le tampon maxi ne peut pas explorer car il ne s'engage pas du tout.

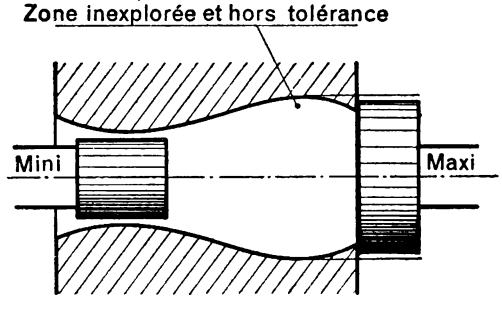


Fig. 60 : Le tampon maxi ne passe pas alors que la cote maxi est dépassée

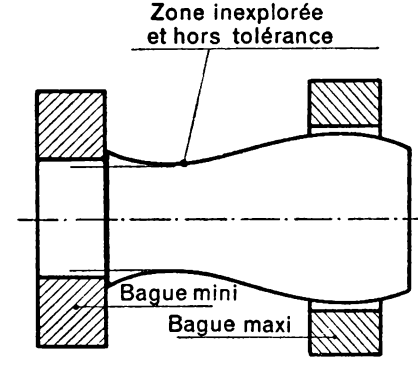


Fig. 61 : La bague mini ne passe pas alors que la cote mini est dépassée

Il en est de même pour un arbre sur lequel la bague mini ne s'engage pas et qui peut présenter des zones hors tolérances (fig. 61).

Ici encore, la qualité de l'ajustement n'est pas conforme aux spécifications établies.

3° Conclusion.

Il en résulte que le tampon maxi et la bague mini sont inefficaces lorsqu'un défaut de forme existe.

B. CONTROLE A LA JAUGE PLATE ET A LA BROCHE SPHÉRIQUE

Dans le cas d'une ovalisation, la jauge plate ou la broche à bouts sphériques permettent une exploration totale mais il est bon de remarquer que le contrôle du minimum de l'alésage se fait avec plus de facilité et avec autant de sûreté avec le tampon mini (fig. 62).

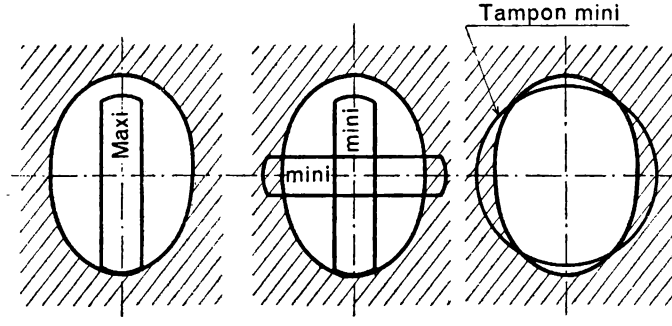


Fig. 62: La jauge plate ou la broche à bouts sphériques permettent l'exploration totale, mais le tampon mini est plus commode pour le contrôle de la cote mini

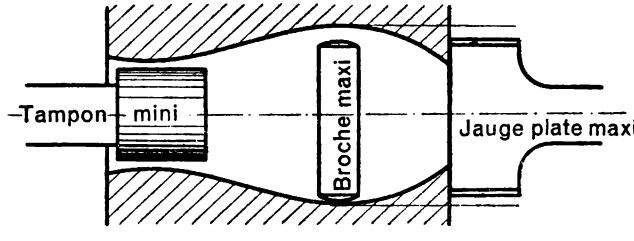


Fig. 63: Seule la broche permet l'exploration totale de la cote maxi

Dans le cas d'une génératrice ondulée, la jauge plate maxi ne pénètre pas mieux que le tampon maxi et seule la broche à bouts sphériques permet une exploration totale du maximum. Le contrôle du minimum est plus commode au tampon (fig. 63).

C. CONTROLE AU CALIBRE A MACHOIRES

Quelle que soit la déformation, le calibre à mâchoires la décèle impitoyablement mais l'investigation est longue et il est bon de remarquer que la bague maxi est commode et même sûre pour le contrôle du maximum (fig. 64).

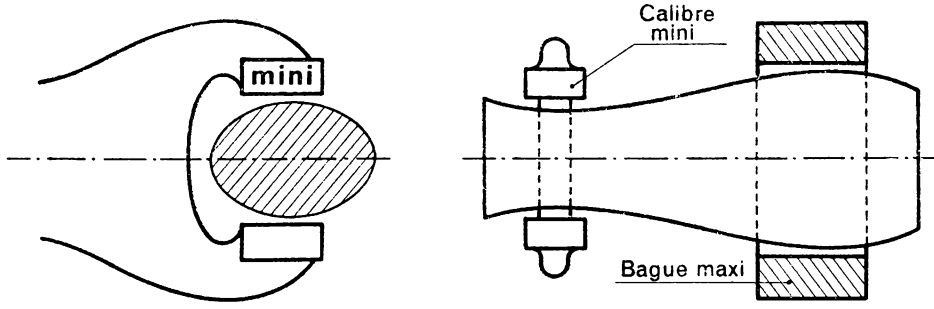


Fig. 64 : Seul le calibre à mâchoires permet l'exploration totale de la cote mini

D. CONTROLE RATIONNEL

1° **Alésage.** Il suffit d'introduire le tampon mini et de s'assurer que la broche à bouts sphériques ne bascule totalement en aucune région de l'alésage.

2° **Arbre.** Il suffit de faire glisser la bague maxi et de s'assurer que le calibre à mâchoires mini ne pénètre en aucune région de l'arbre. Il faut cependant remarquer qu'il est souvent plus rapide, pour les portées courtes surtout, de contrôler le maxi au calibre à mâchoires que de faire glisser la bague maxi sur l'arbre.

Remarque. — Dans le cas d'une production suivie, on se contente avec intérêt de vérifier complètement, comme nous venons de l'indiquer, quelques pièces prélevées périodiquement et de contrôler localement les autres aux tampons maxi et mini ou aux calibres à mâchoires maxi et mini.

Vérification des surfaces coniques

ANALYSE PRÉALABLE

A. GÉNÉRATION DE LA SURFACE CONIQUE

La surface conique est généralement obtenue par les combinaisons de mouvements illustrées par la figure 65.

En **a**, la génératrice est l'arête coupante rectiligne de l'outil de forme placée dans le plan de l'axe de rotation : arête coupante et axe sont concourants ;

En **b**, le déplacement rectiligne de l'outil équivaut à l'arête rectiligne de l'outil de forme. Le diamètre du cercle générateur varie régulièrement au cours de son déplacement.

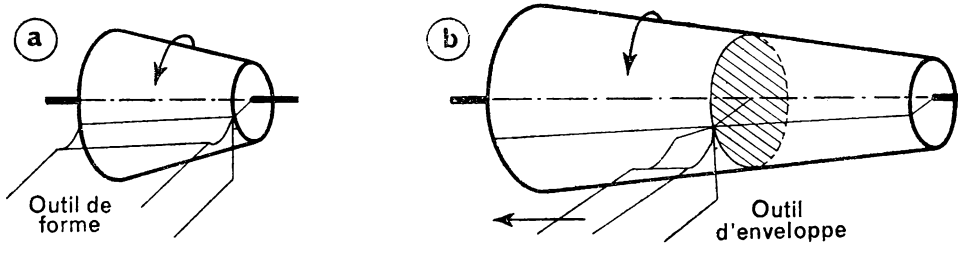


Fig.65: Génération d'une surface conique:
a) par un mouvement circulaire
b) par un mouvement circulaire & un mouvement rectiligne

B. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

Il y a une très grande analogie entre le cône et le cylindre et les imperfections de génération seront dues aux mêmes causes :

— arête coupante de l'outil générateur et axe de rotation non concourants (fig. 66 - **a**);
— trajectoire de l'outil générateur et axe de rotation non concourants (fig. 66 - **b**);
— axe matériel de rotation du cône à engendrer ou position de l'outil non immuables en raison des déformations ou de mauvais maintien.

C. DÉFAUTS DE LA SURFACE CONIQUE

On trouvera le plus souvent :

— des génératrices concaves provenant de ce que l'arête coupante, ou sa trajectoire, ne sont pas dans le plan de l'axe (ces droites ne sont pas concourantes) (fig. 66).

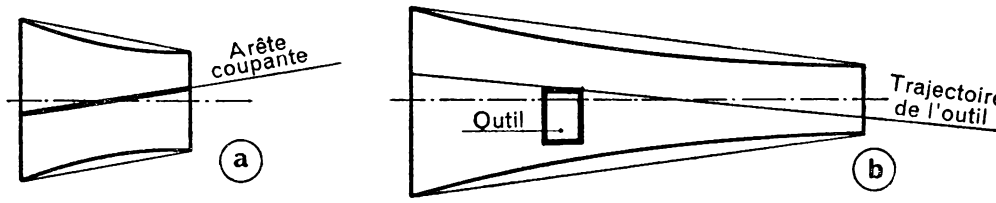


Fig.66: Imperfections de génération du cône:
a) arête coupante & axe non concourants
b) trajectoire de l'outil & axe non concourants

Ce défaut est courant lorsque l'arête de l'outil générateur est très au-dessous de l'axe des pointes du tour (fig. 67);

— des génératrices convexes, ou ondulées, provenant de déformations de la pièce par flexion;

— une conicité non conforme aux spécifications consécutive à un mauvais réglage de l'outil de forme ou de la trajectoire de l'outil d'enveloppe (chariot porte-outil, glissière du reproducteur...);

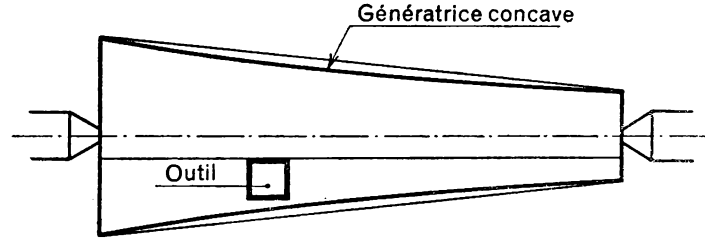


Fig.67: L'arête coupante est au-dessous de l'axe des pointes: la génératrice du cône est concave

— une section droite non circulaire consécutive à un mauvais maintien de l'axe du cône ou de l'outil. Comme pour le cylindre, elle a alors une forme elliptique, ou ovale ou polygonale (voir fig. 38).

D. ADAPTATION DU CONTROLE

L'intérêt d'un assemblage conique réside surtout dans la recherche de la perfection de l'alignement des pièces assemblées et dans l'absence totale de jeu d'ajustement. Pour que ces deux objectifs soient atteints, il suffit que la conicité soit la même sur les deux cônes en contact.

Le contrôle du cône portera donc surtout sur l'exactitude de la conicité et sur la rectitude de la génératrice. Le diamètre de la base de référence du cône et la forme circulaire de la section droite ne seront vérifiés avec grande précision qu'assez exceptionnellement, dans le cas d'outillage précis ou de calibres de contrôle, par exemple.

I. — CONTROLE DE LA CONICITÉ ET DE LA RECTITUDE DE LA GÉNÉRATRICE

La conicité **C** % est égale à la différence des diamètres pour une longueur de 100 *mm* (fig. 68).

$$\text{Conicité } \mathbf{C}\ \% = \frac{\mathbf{D - d}}{\mathbf{L}} \times 100.$$

L'inclinaison de la génératrice sur l'axe, ou demi-angle au sommet du cône α est donnée par la relation : $\mathbf{tg}\ \alpha = \frac{\mathbf{D - d}}{\mathbf{2L}}$.

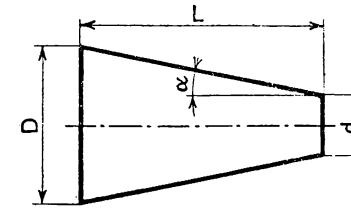


Fig. 68: Caractéristiques d'un cône

A. DÉTECTION DES DÉFAUTS DE RECTITUDE DE LA GÉNÉRATRICE

Il suffit pour les dévoiler de placer la génératrice contre la surface plane d'un marbre ou d'une règle et d'observer le jour qui filtre entre les contacts.

B. CONTROLE PAR COMPARAISON AVEC UN ÉTALON

Le calibre se compose d'une bague et d'un tampon (fig. 69).

La vérification se fait en cours d'usinage pendant la phase de réglage de la machine-outil. Il suffit de s'assurer en faisant glisser la bague sur la pièce ou en y faisant pénétrer le tampon, préalablement enduit d'un colorant, que le cône *porte* ou *ne porte pas*. L'enfoncement doit être suivi d'une courte rotation qui assure le centrage et fait apparaître les parties portantes.

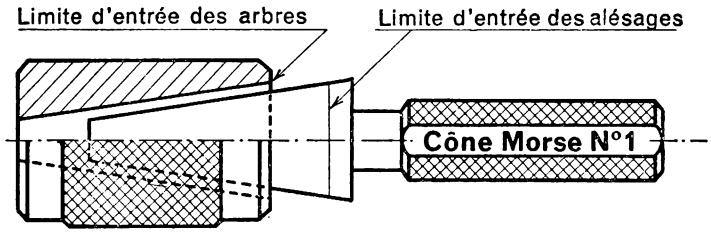


Fig. 69: Bague & tampon coniques au cône Morse N° 1

La coïncidence parfaite est atteinte après retouches obtenues par tâtonnements.

Ce contrôle laisse une grande part d'arbitraire car il est lié à l'appréciation de l'opérateur. Il est cependant suffisant dans la plupart des fabrications courantes.

C. CONTROLE PAR MESURE

1° Surfaces coniques extérieures (cônes mâles).

a) Le comparateur pneumatique « Solex » comprend un appareil pour montage entre pointes dont l'axe est inclinable (fig. 70). Le règlage de l'inclinaison est obtenu par interposition de cales étalons dont la hauteur **H** est préalablement calculée. On a :

$$\sin \alpha = \frac{H}{L} \text{ d'où } H = L \times \sin \alpha = 200 \sin \alpha \text{ car la longueur } L \text{ est égale à } 200 \text{ mm.}$$

L'appareil se déplace sous le palpeur suivant une génératrice du cône grâce au guidage assuré par les deux languettes du socle.

La lecture des écarts marque l'incorrection de la conicité ou de la rectitude de la génératrice.

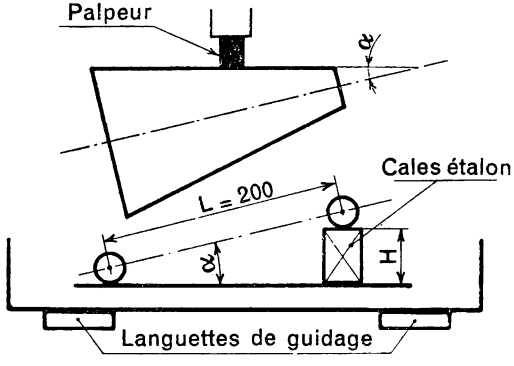


Fig. 70: Appareil entre-pointes accessoire du comparateur Solex

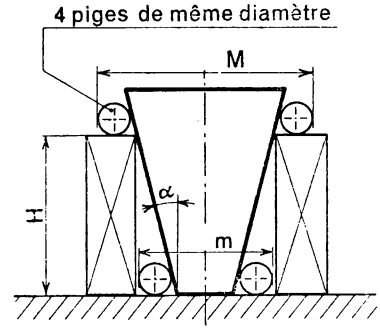


Fig. 71: Mesure de la conicité par la méthode des piges

b) Après avoir vérifié la rectitude de la génératrice à la règle, **on peut contrôler la conicité en employant quatre piges identiques** (fig. 71). Deux des piges reposent sur des cales de hauteur identique **H.** On a :

$$\text{tg } \alpha = \frac{(M - m)}{2H} \text{ d'où } (M - m) = 2H \times \text{tg } \alpha$$

La différence des lectures faites entre les piges en **M** et **m** doit donc avoir la valeur connue 2 **H** tg α.

c) La mesure de l'angle d'inclinaison est obtenue avec précision par l'emploi du **rapporteur-sinus** que nous étudierons au chapitre mesure des angles (page 67).

2° Surfaces coniques intérieures (cônes femelles).

a) Pour les cônes d'assez grande ouverture, on utilise généralement une table articulée dite **table-sinus** (fig. 72). Le règlage en fonction de l'angle α est obtenu par interposition d'une cale de hauteur **H** préalablement calculée par la relation $\mathbf{H = L \sin \alpha}$, la longueur **L** étant caractéristique de l'appareil. La rectitude de la génératrice est observée par la constance des lectures au comparateur, après règlage de l'inclinaison.

Les résultats ne sont précis que si le comparateur à touche articulée est manié délicatement.

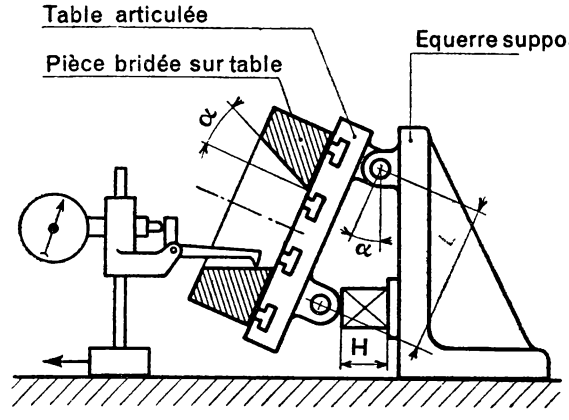


Fig. 72: Contrôle de la rectitude de la génératrice & de l'angle au sommet d'un gros alésage conique

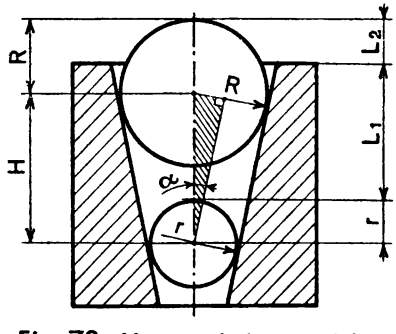


Fig. 73: Mesure de la conicité à l'aide de billes

b) Pour les cônes de petite ouverture on peut utiliser **deux billes de diamètre connu** qu'on laisse descendre sans choc jusqu'au contact avec la surface conique (fig. 73).

On mesure successivement les hauteurs $\mathbf{L_1}$ et $\mathbf{L_2}$ et on en déduit

$$\mathbf{H = r + L_1 + L_2 - R} \text{ puis } \mathbf{\sin \alpha = \frac{R - r}{H}}.$$

On calcule généralement en fonction des diamètres **D** et **d** des billes, ce qui conduit à

$$\mathbf{\sin \alpha = \frac{1}{\frac{2\,(L_1 + L_2)}{D - d} - 1}}$$

II. — CONTROLE ET MESURE DU DIAMÈTRE DE BASE

Ce contrôle ne présente un intérêt que si la pénétration du cône est soumise à des nécessités de montage. La tolérance sur le diamètre se traduit donc par une tolérance de longueur (fig. 74).

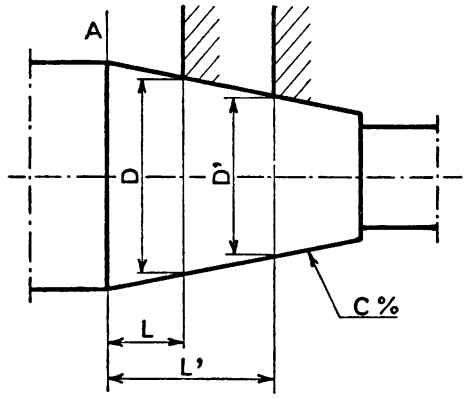


Fig. 74 : Une différence de diamètre conduit à une variation de la pénétration

Si **D** est le diamètre de base et **C** % la conicité, les distances **L** et **L'** à la face de référence **A** seront liées par la relation :

$$C\,\% = \frac{D - D'}{L' - L} \times 100 \text{ d'où}$$

$$L' - L = \frac{D - D'}{C\,\%} \times 100.$$

Ex. : Pour un axe dont la conicité est de 10 %, une tolérance en diamètre de 0,04 *mm* conduira à une variation de pénétration de

$$L' - L = \frac{0{,}04}{10} \times 100 = 0{,}4 \text{ mm}.$$

Pour une goupille de 2 % de conicité on aurait

$$L' - L = \frac{0{,}04}{2} \times 100 = 2 \text{ mm}.$$

A. CONTROLE PAR COMPARAISON AVEC UN ÉTALON

La bague et le tampon qui servent au contrôle de la conicité portent un repère de limite d'entrée du cône (voir fig. 69).

On peut fixer des limites maxi et mini et rendre le contrôle plus facile en épaulant la bague et le tampon (fig. 75). Le cône doit pénétrer entre les deux épaulements.

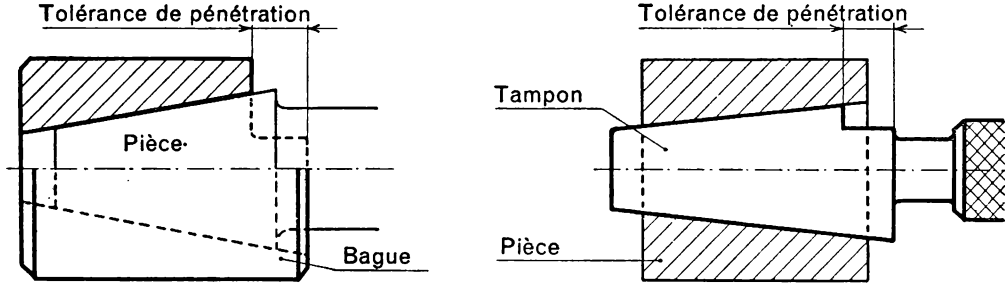


Fig. 75 : Contrôle de diamètre par pénétration

B. CONTROLE PAR MESURE

La mesure n'est possible que si la conicité est connue et préalablement vérifiée. Nous supposerons donc que sa valeur est **C** % et que l'inclinaison de la génératrice est égale à α.

1° Cône mâle. Les calculs qui suivent résultent de l'étude de la figure 76. Les piges ont un diamètre connu $\mathbf{d_p}$ et on mesure la cote **m**. On a :

$$\mathbf{d = m - 2\,n} \text{ avec } \mathbf{n = r_p + \overline{ab}} \text{ et } \mathbf{\overline{ab} = r_p \times cotg\ \frac{\beta}{2}}$$

β étant le complément de α

d'où $\mathbf{2\,n = d_p\,(1 + cotg\ \frac{\beta}{2})}$

et finalement $\mathbf{d = m - d_p\,(1 + cotg\ \frac{\beta}{2})}$

Comme $C\,\% = \dfrac{\mathbf{D - d}}{\mathbf{L}} \times 100$ et **L** étant connue, on aura

$$\mathbf{D} = \frac{\mathbf{C}\,\% \times \mathbf{L}}{100} + \mathbf{d}$$

Tout autre diamètre se déduira ensuite de la distance qui le sépare de la petite base de diamètre **d**.

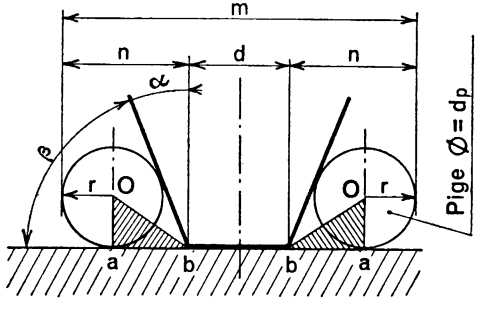


Fig. 76 : Mesure d'un diamètre de cône mâle

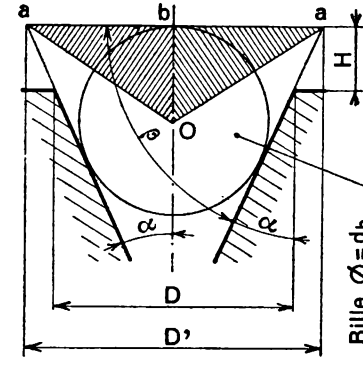


Fig. 77 : Mesure d'un diamètre de cône femelle

2° Cône femelle. Un calcul analogue au précédent, appliqué à la figure 77 conduit aux résultats suivants :

$$\mathbf{D = D' - 2\,H\ tg\ \alpha} \text{ avec } \mathbf{D' = d_b\ cotg\ \frac{\beta}{2}}$$

soit finalement $\mathbf{D = d_b\ cotg\ \frac{\beta}{2} - 2\,H\ tg\ \alpha}$

et $\mathbf{d = D - \dfrac{C\,\% \times L}{100}}$

III. — CONTROLE DES DÉFAUTS DE FORME DE LA SECTION

Ce contrôle ne peut présenter de l'intérêt que pour des surfaces coniques de référence, calibres en particulier, ou devant assurer l'étanchéité entre deux enceintes. Dans ce dernier cas, d'ailleurs, le rodage est souvent le meilleur correctif des défauts.

On peut détecter les défauts de forme de la section à l'aide de l'appareil entre pointes accessoire du comparateur Solex (voir fig. 70), ou encore en posant le cône sur deux vés et en le butant à une extrémité comme pour la vérification de la forme du cylindre (voir fig. 53 et 54). La forme est correcte si le niveau dans le tube manométrique reste constant lorsqu'on fait tourner le cône sur lui-même.

Remarque. — Les surfaces coniques obtenues par l'intermédiaire d'un appareil de reproduction ne présentent généralement pas de défauts de forme.

Vérification des surfaces sphériques

ANALYSE PRÉALABLE

A. GÉNÉRATION DE LA SURFACE SPHÉRIQUE

Elle est obtenue le plus généralement (fig. 78)

en **a**, par un outil de forme dont l'arête coupante est circulaire,

en **b**, par un outil d'enveloppe et la combinaison de deux mouvements circulaires autour de deux axes perpendiculaires.

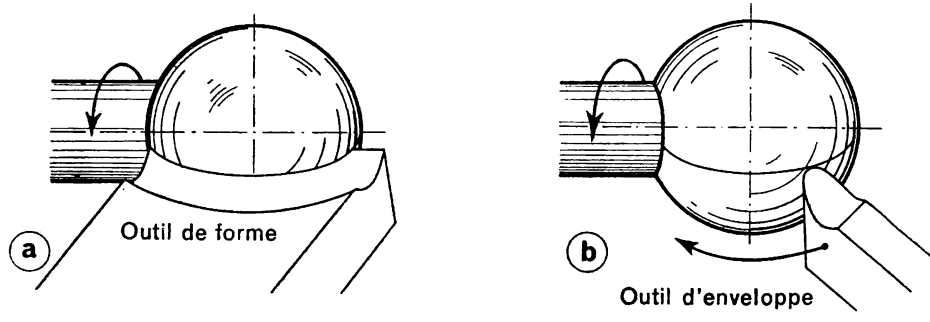


Fig. 78: Génération d'une surface sphérique :
a) par un mouvement circulaire
b) par deux mouvements circulaires

B. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, DÉFAUTS DE LA SURFACE SPHÉRIQUE

Lorsque la génération est obtenue par outil de forme, le mauvais règlage de l'outil provoque les défauts suivants, indépendamment de la correction de son arête coupante qui doit être un arc de cercle parfait :

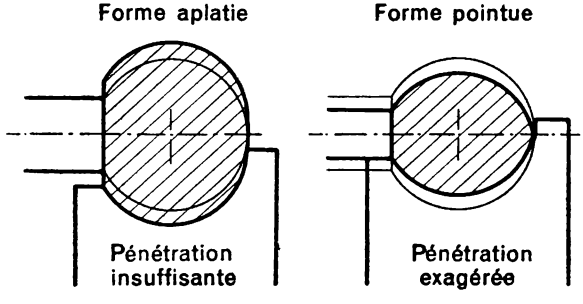


Fig. 79: Pénétration incorrecte de l'outil de forme

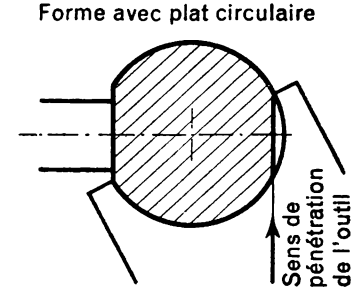


Fig. 80: Outil de forme mal aligné

— forme aplatie ou pointue si la pénétration de l'outil est insuffisante ou exagérée (fig. 79), ou si l'arête n'est pas placée à bonne hauteur par rapport à l'axe ;

— forme avec plat circulaire à l'extrémité lorsque l'outil est mal aligné (fig. 80).

Lorsque la génération est obtenue par outil d'enveloppe, on obtient une sphère si l'axe de rotation de l'outil est perpendiculaire à celui de la surface sphérique. Dans le cas contraire :

— la forme sera creuse à l'extrémité pour des axes non concourants (fig. 81) ;

— la forme sera incomplète pour des axes non perpendiculaires (fig. 82).

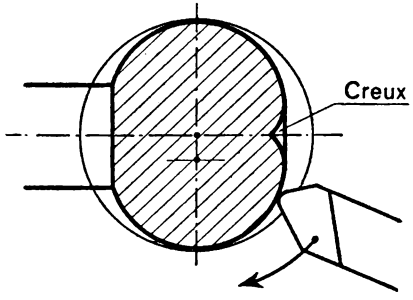


Fig. 81 : Les axes de rotation ne sont pas concourants

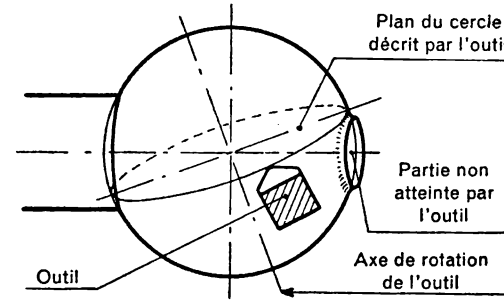


Fig. 82 : Les axes de rotation ne sont pas perpendiculaires

Des défauts de forme indépendants des précédents seront toujours provoqués par une position non immuable des axes de la sphère ou de l'outil due à des déformations ou à un mauvais maintien.

C. ADAPTATION DU CONTROLE

La surface sphérique ne requiert aucune qualité sérieuse de forme ou de dimension lorsqu'elle répond à un but esthétique : extrémité de manivelle, de levier, masse d'équilibrage... Dans ce cas, l'outil de forme peut donner un résultat acceptable et il suffit de mesurer le diamètre suivant l'axe général de la pièce. Les dispositifs à copier donnent évidemment une meilleure correction géométrique.

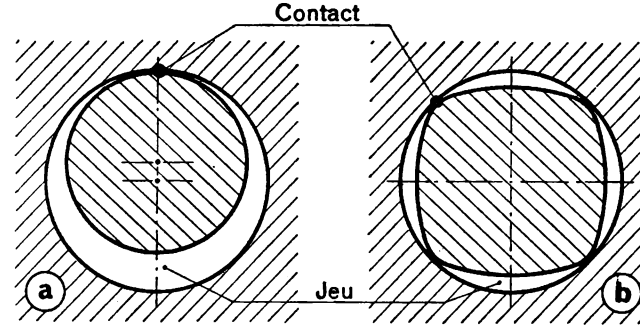


Fig. 83 : Deux surfaces sphériques ne sont ajustables que si elles ont une forme correcte et le même diamètre :
a) diamètres différents
b) surface mâle incorrecte

Lorsque la surface sphérique doit jouer le rôle de rotule — elle est alors incomplète — ou d'organe de roulement (bille) la vérification demande un soin particulier parce qu'il faut obtenir à la fois une forme correcte et un diamètre précis. Deux surfaces sphériques ne peuvent s'ajuster qu'à cette double condition (fig. 83).

PROCÉDÉS DE CONTROLE DES SURFACES SPHÉRIQUES

I. — DÉTECTION DES DÉFAUTS DE FORME

A. PAR OBSERVATION VISUELLE A LA LUNETTE

Lorsque la sphère est incomplète, on applique sur sa surface l'extrémité circulaire en biseau d'un tube parfaitement cylindrique appelé **lunette** (fig. 84).

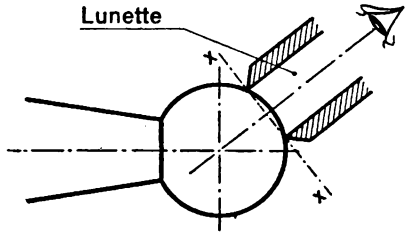


Fig.84: Lunette de contrôle de forme

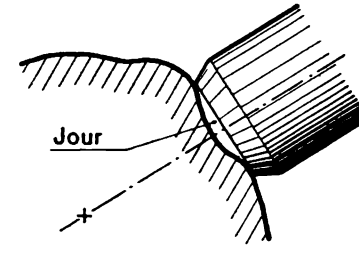


Fig.85: Les jours correspondent aux défauts de sphéricité

Si le contact ne laisse filtrer aucun jour, c'est que le cercle de la lunette s'adapte à un cercle identique de la sphère et que cette surface est correcte. Si la lumière filtre entre la lunette et la pièce, c'est qu'il y a défaut de forme (fig. 85).

B. PAR MESURE D'ÉCARTS AU COMPARATEUR

La vérification de forme dans le cas d'une bille se fait par mesure des écarts au comparateur, la bille reposant sur un **vé à trois touches** (fig. 86).

II. — VÉRIFICATION DU DIAMÈTRE ET MESURE DES DÉFAUTS

A. SUR VÉ A TROIS TOUCHES

La sphère est placée sur le vé à trois touches précédent et les écarts de diamètre **e** sont déduits de la lecture **E** par rapport à la position d'étalonnage correspondant à une bille étalon (fig. 86).

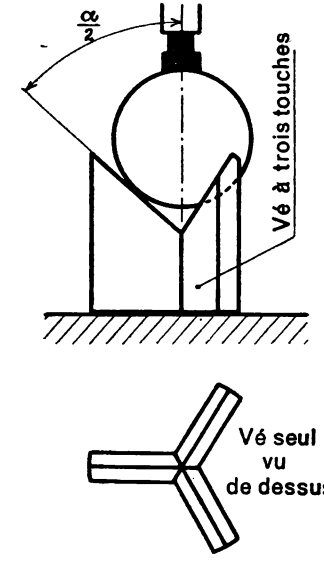


Fig.86: Détection des défauts au comparateur sur vé à trois touches

On a (voir fig. 45) $e = 2E \dfrac{\sin \frac{\alpha}{2}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}$ et comme $\frac{\alpha}{2}$ est généralement égal à 60°, l'écart réel est donné par la relation $e = 0{,}928\ E$.

B. SUR APPUI PLAN

La sphère est appliquée dans l'ouverture d'un vé servant de centreur et repose sur un appui plan (fig. 87). Un comparateur de grande sensibilité (micromètre Solex ou micro-mesureur) préalablement étalonné à l'aide de cales étalons donne directement les écarts de diamètre avec une précision de l'ordre de 1 μ.

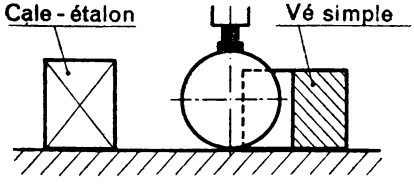


Fig. 87: Mesure directe des écarts de diamètre

C. POUR SURFACES SPHÉRIQUES INTÉRIEURES

On peut utiliser les mêmes appareils de mesure que pour les cylindres intérieurs, soit : le micromètre d'intérieur, la jauge à trois touches à 120° (fig. 47), le comparateur à deux touches avec centreur à patin (fig. 48).

D. AU SPHÉROMÈTRE POUR SURFACES SPHÉRIQUES DE GRANDE COURBURE

Le sphéromètre permet la mesure indirecte du diamètre à partir du contact des trois touches sphériques de rayon r qui le portent (fig. 88).

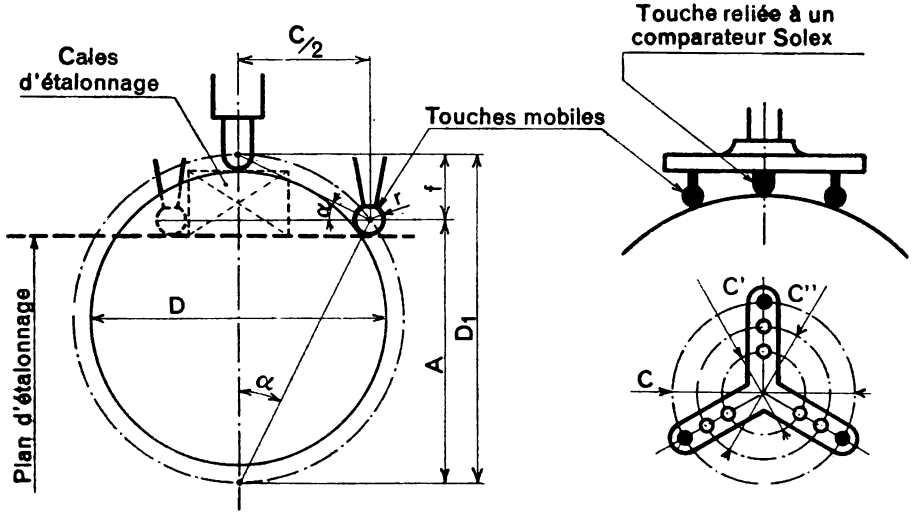


Fig. 88: Sphéromètre et mesure au sphéromètre

Ce contact détermine un cercle de référence de diamètre **c** connu. La flèche **f** par rapport à ce cercle est lue au comparateur Solex dont le palpeur est au centre des trois touches. L'étalonnage préalable est obtenu à la cale, les trois touches s'appuyant sur un plan et la cale placée sous le palpeur.

L'examen de la figure et les calculs qui s'y rapportent conduisent à :

$$\mathbf{D_1} = \frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{4\,f}} + \mathbf{f}$$

et au diamètre de la surface sphérique

$$\mathbf{D} = \mathbf{D_1} - 2\,\mathbf{r} = \frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{4\,f}} + \mathbf{f} - 2\,\mathbf{r}$$

III. — VÉRIFICATION DE LA POSITION DE LA SURFACE SPHÉRIQUE

Lorsque la sphère est à une extrémité libre, la distance **A** du centre à la face plane de référence est déterminée par les moyens habituels (fig. 89 **a**). $\mathbf{A} = \mathbf{L} - \frac{\mathbf{D}}{2}$.

Lorsque la sphère n'a pas d'extrémité libre, on peut la monter sur une cale cylindrique formant cuvette conique et, après avoir assuré le parallélisme de l'axe et de la table, déterminer la distance **L** (fig. 89 **b**). On a alors $\mathbf{A} = \mathbf{L} + \frac{\mathbf{d}}{2}$.

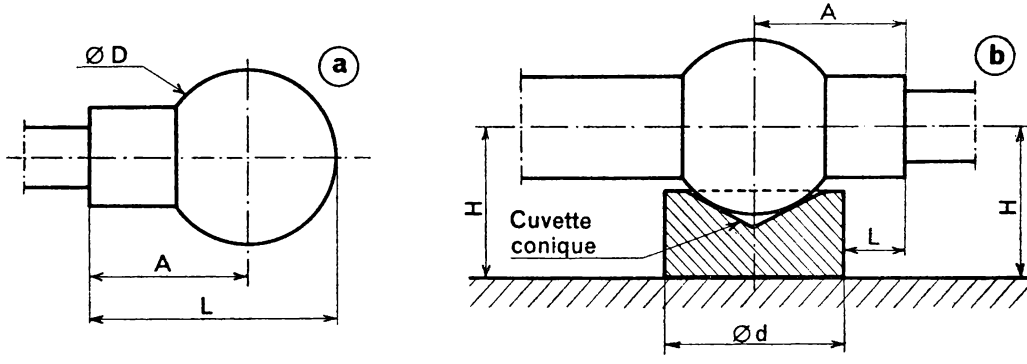


Fig. 89: Vérification de la position d'une portée sphérique extérieure
a) Extrémité libre : $A = L - \frac{D}{2}$
b) Portée intermédiaire : $A = L + \frac{d}{2}$

Pour une portée sphérique intérieure, on peut utiliser une cale sphérique de même diamètre **D**, dégagée comme l'indique la figure 90. La distance **L** n'est pas affectée par un léger pivotement de la cale et on a $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{D}}{2} - \mathbf{L}$.

Une vérification très précise, dont la nécessité n'est d'ailleurs qu'exceptionnelle, exigerait l'étude d'un appareillage adapté à chaque cas particulier.

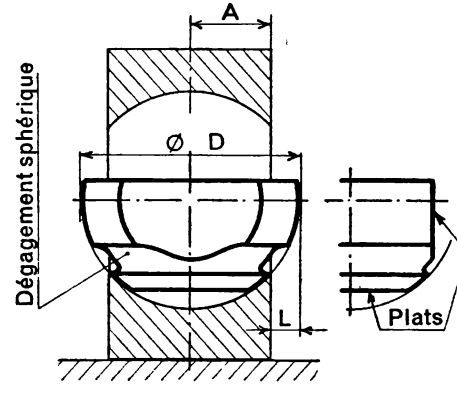


Fig.90: Vérification de la position d'une surface sphérique intérieure $A = \frac{D}{2} - L$

Vérification de la position relative des surfaces

Tout ensemble mécanique est constitué par plusieurs organes dont la juxtaposition doit répondre à des spécifications de formes et de dimensions très strictes. Il s'ensuit que les surfaces de contact de ces différents organes exigent un contrôle rigoureux de leur position relative.

On aura donc, après avoir vérifié la correction des surfaces élémentaires, à mesurer leurs distances, à contrôler leur parallélisme, à mesurer ou à contrôler les angles qu'elles forment.

I. — MESURE DES DISTANCES ENTRE SURFACES

Nous ne reprendrons pas dans ce chapitre l'étude des appareils de mesure qui a été faite dans les ouvrages précédents.

A. MESURE DE LA DISTANCE ENTRE DEUX PLANS PARALLÈLES

Cette mesure, qu'elle soit directe ou indirecte, a fait l'objet de plusieurs leçons notamment en classe de 3e et de 2e.

B. MESURE DE LA DISTANCE ENTRE L'AXE D'UN CYLINDRE ET UN PLAN

On ne peut pas localiser directement ni matérialiser l'axe d'une surface de révolution. La mesure de la distance entre cet axe et un plan sera donc toujours indirecte.

On sera conduit à placer, dans l'alésage cylindrique, un mandrin qui ne présente aucun jeu et à mesurer la distance $\mathbf{h_1}$ entre le plan et la génératrice inférieure du mandrin ou $\mathbf{h_2}$ entre le plan et la génératrice supérieure (fig. 91). Le mandrin ayant un diamètre **D** connu, la distance **H** sera donnée par l'une ou l'autre des relations :

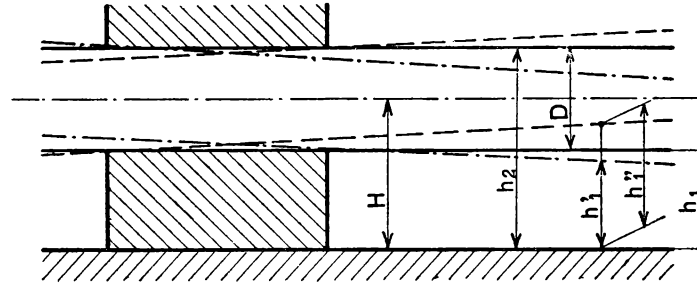


Fig.91: Mesure de la distance de l'axe d'un cylindre à un plan

$$\mathbf{H = h_1 + \frac{D}{2}} \quad \text{ou} \quad \mathbf{H = h_2 - \frac{D}{2}}$$

Si le mandrin n'est pas parfaitement ajusté, la mesure est faussée car on a $h'_1 < h_1$ ou $h_1'' > h_1$. L'erreur est d'autant plus importante qu'on s'écarte de la face terminale de l'alésage.

La mesure se fera donc toujours le plus près possible de la face qui limite l'alésage ou, en cas d'impossibilité, à partir d'un mandrin expansible se montant sans jeu dans l'alésage (voir fig. 177).

C. MESURE DE LA DISTANCE ENTRE L'AXE D'UN CONE ET UN PLAN

Le mandrin entre en contact sans aucun jeu avec l'alésage conique (fig. 92). La mesure ne présente donc aucune erreur et la distance est donnée par :

$$H = h_1 + \frac{D}{2} \quad \text{ou} \quad H = h_2 - \frac{D}{2}$$

Remarque. — Nous avons donné (fig. 76 et 77) le procédé de mesure de la position de la base du cône par rapport à un plan.

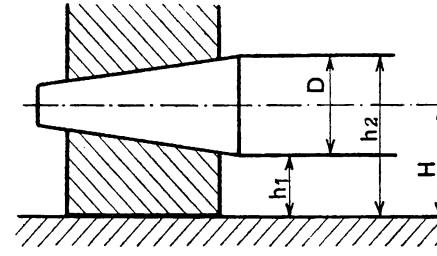


Fig. 92: Distance de l'axe d'un cône à un plan

D. MESURE DE LA DISTANCE ENTRE L'AXE D'UNE SPHÈRE ET UN PLAN

L'appareil à trois touches schématisé figure 93 peut être utilisé pour cette mesure. Un manche cylindrique porte un piston glissant à tête conique qui écarte trois touches disposées à 120° et provoque le centrage du système dans l'axe de la sphère.

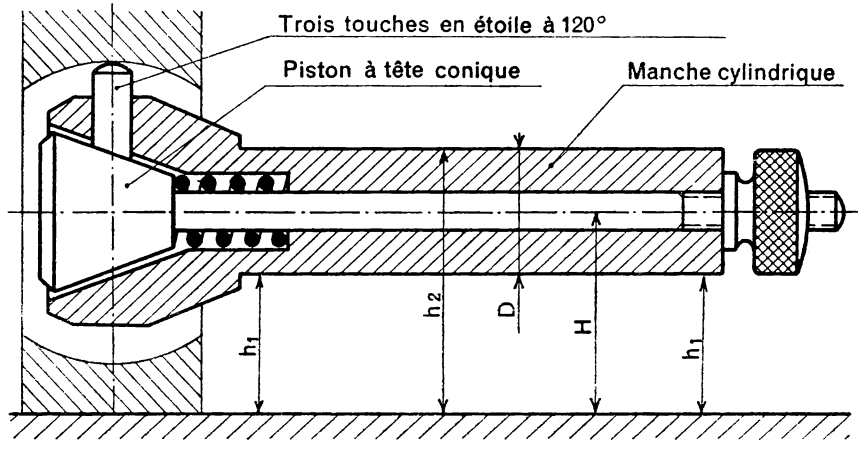


Fig. 93: Mesure de la distance de l'axe d'une sphère à un plan

Il suffit alors de régler le parallélisme de l'axe et du plan et de mesurer $\mathbf{h_1}$ ou $\mathbf{h_2}$ pour obtenir :

$$\mathbf{H} = \mathbf{h_1} + \frac{\mathbf{D}}{2} \quad \text{ou} \quad \mathbf{H} = \mathbf{h_2} - \frac{\mathbf{D}}{2}$$

Remarque. — Nous avons donné (fig. 89 et 90) les procédés de mesure de la position transversale de l'axe de la sphère par rapport à un plan.

E. MESURE DE L'ENTRE AXES DE DEUX SURFACES DE RÉVOLUTION

Il suffit de placer dans chaque surface un mandrin conforme à ceux dont nous venons de parler et de déduire la distance entre axes (fig. 94) des relations générales.

$$\mathbf{L} = \mathbf{h_1} + \frac{\mathbf{D} + \mathbf{D'}}{2} \quad \text{ou} \quad \mathbf{L} = \mathbf{h_2} - \frac{\mathbf{D} + \mathbf{D'}}{2}$$

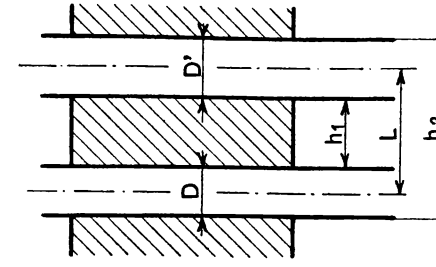


Fig.94: Mesure de l'entraxe de deux surfaces de révolution

Un autre procédé consiste à transformer le système de cote direct (fig. 95) en système de cote indirect rapporté à deux axes de coordonnées rectangulaires (fig. 96).

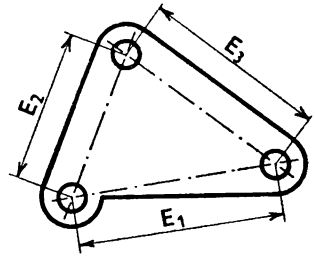


Fig.95: Système de cote direct

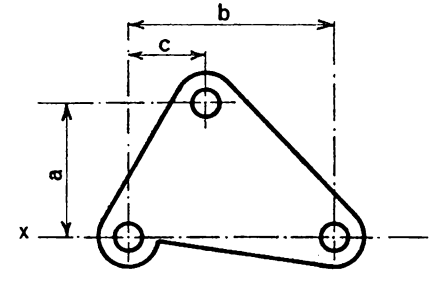


Fig.96: Système de cote par coordonnées rectangulaires

La mesure se fait alors en deux temps (fig.97).

1er temps. — au comparateur pour les hauteurs indirectes $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{a_2}$, $\mathbf{a_3}$, après avoir dégauchi l'axe **x x'** horizontalement sur le marbre.

2e temps. — au comparateur pour les hauteurs indirectes **h**, $\mathbf{c_1}$, $\mathbf{b_1}$, après avoir dégauchi l'axe **x x'** verticalement sur le marbre.

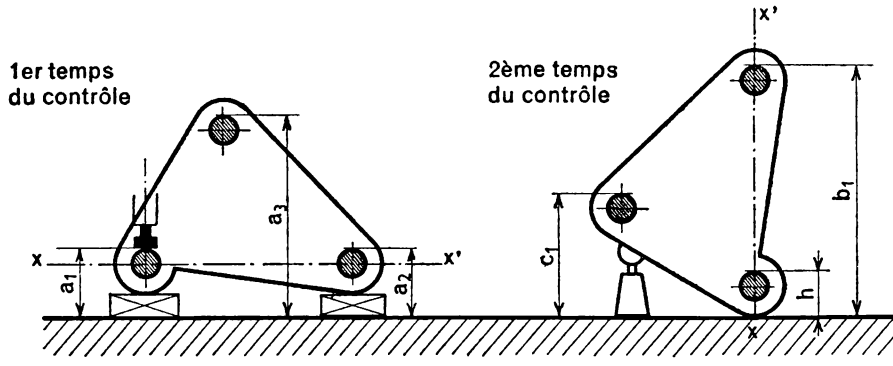


Fig. 97: Mesure d'entre axes d'après les coordonnées

F. MESURE DE LA DISTANCE DE L'AXE D'UNE SURFACE DE RÉVOLUTION A L'ARETE D'UN DIÈDRE

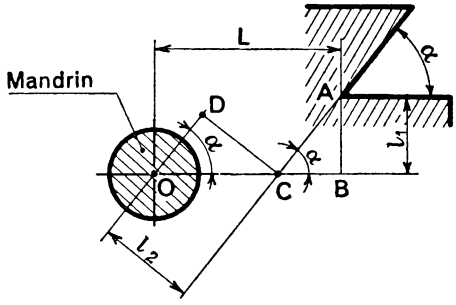


Fig. 98: Distance de l'axe d'une surface de révolution à l'arête d'un dièdre

Qu'il s'agisse d'un cylindre, ou d'un cône, ou d'une sphère, le mandrin qui matérialise la position de son axe est cylindrique et nous ne traiterons donc le problème que dans le cas du cylindre.

Soient **O** le centre du cylindre et **A** l'arête du dièdre (fig. 98). Nous pouvons mesurer indirectement les distances $\mathbf{l}_1$ et $\mathbf{l}_2$ et, connaissant l'angle α, en déduire par le calcul la distance **L**.

On a en effet :

$$\mathbf{L} = \mathbf{OC} + \mathbf{CB} = \frac{\mathbf{CD}}{\sin \alpha} + \frac{\mathbf{AB}}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$\mathbf{L} = \frac{\mathbf{l}_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{\mathbf{l}_2}{\sin \alpha}$$

Les faces du dièdre étant généralement très courtes, il est plus rationnel d'utiliser une pige et d'appliquer la méthode suivante (fig. 99) :

— mettre les faces 1 et 1′ dans le même plan horizontal et mesurer $\mathbf{h}_1$ de laquelle on déduit $\mathbf{h} = \mathbf{h}_1 + \frac{\mathbf{D} - \mathbf{d}}{2}$;

— puis mesurer la distance $\mathbf{l}_1$ de laquelle on déduit $\mathbf{l} = \mathbf{l}_1 - \frac{\mathbf{D} + \mathbf{d}}{2}$;

— calculer la distance $\mathbf{L}_1 = \sqrt{\mathbf{l}^2 - \mathbf{h}^2}$ puis $\mathbf{L}_2 = \frac{\mathbf{d}}{2} \operatorname{cotg} \frac{\alpha}{2}$.

— en déduire $\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2$.

II. — VÉRIFICATION DU PARALLÉLISME DES SURFACES

La vérification du parallélisme de deux surfaces peut toujours se ramener :

— à la mesure de l'écartement entre les surfaces ;

— à la mesure de la variation de l'écartement entre les surfaces.

A. PARALLÉLISME DE DEUX SURFACES PLANES

On le vérifie le plus souvent à l'aide du comparateur, dont la sensibilité est choisie en fonction de la précision du parallélisme exigée.

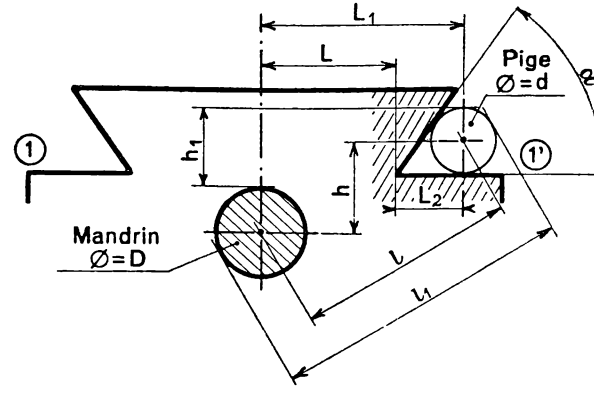


Fig. 99: Distance de l'axe d'une surface de révolution à l'arête d'un dièdre

La vérification est directe lorsque l'une des surfaces s'appuie sur le plan de référence (fig. 100). On notera qu'il vaut mieux faire glisser la pièce sous le palpeur plutôt que le palpeur sur la pièce car on évite ainsi les vibrations des tiges supports du comparateur pendant le déplacement. On enregistre les écarts en suivant des lignes de contrôle préalablement tracées sur la pièce et on peut dresser ensuite un graphique de ces écarts.

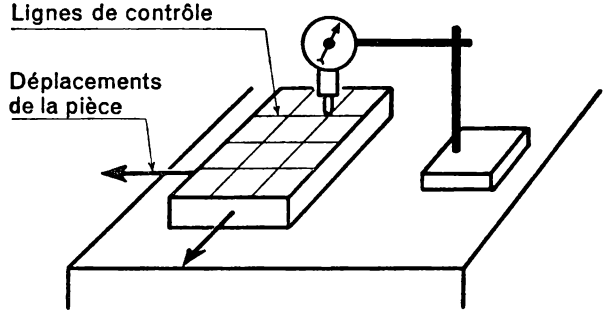


Fig. 100: Contrôle du parallélisme de deux surfaces planes

La vérification est indirecte lorsque la pièce repose sur le plan de référence par une surface auxiliaire (fig. 101).

Dans ce cas, il faut confronter les deux graphiques d'écarts des surfaces **1** et **2** par rapport au plan auxiliaire **P** pour avoir les variations de parallélisme des deux surfaces **1** et **2** entre elles.

L'écart réel **h** est égal à la différence algébrique des deux autres écarts $\mathbf{h_1}$ et $\mathbf{h_2}$.

Exemples : Si $\mathbf{h_1} = +5\ \mu$ et $\mathbf{h_2} = -3\ \mu$, on a $\mathbf{h} = 5 - (-3) = 8\ \mu$
Si $\mathbf{h_1} = +5\ \mu$ et $\mathbf{h_2} = +3\ \mu$, on a $\mathbf{h} = 5 - 3 = 2\ \mu$

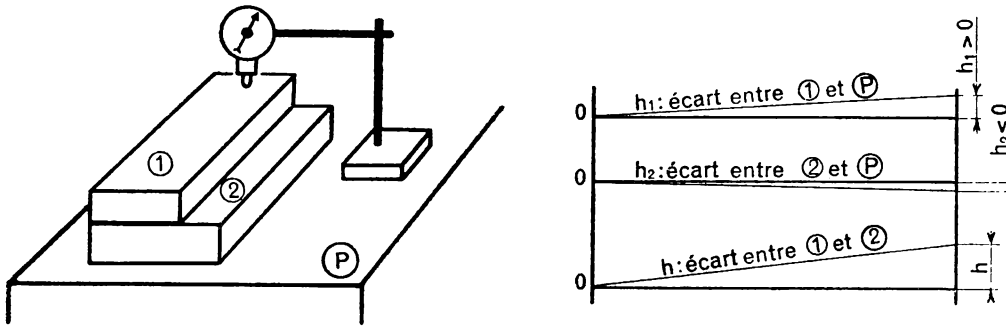


Fig. 101: Vérification indirecte du parallélisme de deux surfaces planes
On a ici : $h = h_1 - (-h_2) = h_1 + h_2$

***Remarque.* — La vérification ne peut être efficace que si les surfaces élémentaires ont été préalablement contrôlées.** Dans le cas contraire, les défauts de planéité des surfaces de référence et des surfaces à contrôler, en s'ajoutant ou en se retranchant, provoqueraient l'incertitude de la vérification.

B. PARALLÉLISME DES GÉNÉRATRICES DE DEUX SURFACES PLANES

Le contrôle du parallélisme des flancs d'une glissière ou d'un coulisseau en queue d'aronde se ramène à celui des deux droites $\mathbf{D_1}$ et $\mathbf{D_2}$ suivant lesquelles deux piges d'égal diamètre s'appuient sur les deux flancs (fig. 102).

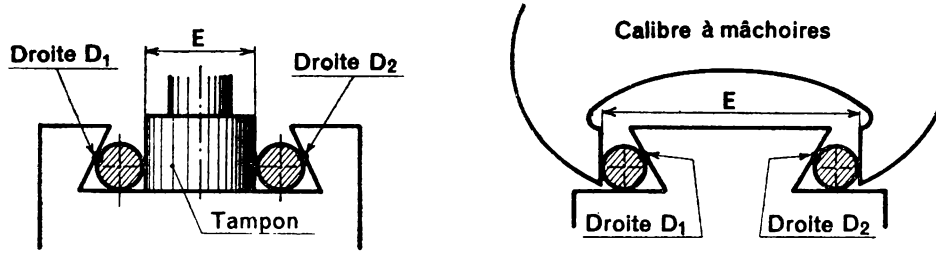


Fig. 102: Vérification du parallélisme des génératrices des flancs d'une glissière

L'écartement **E** entre les piges est mesuré par les moyens habituels ou contrôlé par des calibres à limites. Dans ce dernier cas, le diamètre des piges est préalablement calculé en fonction du calibre à limites employé.

***Remarque.* — Lorsque la glissière en queue d'aronde porte un lardon de rattrapage de jeu à pente longitudinale, la différence L des lectures faites entre les piges, pour une**

longueur de glissière donnée, ne correspond pas à la différence d'épaisseur **l** du lardon pour cette même longueur.

On a en effet (fig. 103) : $l = L \sin \alpha$.

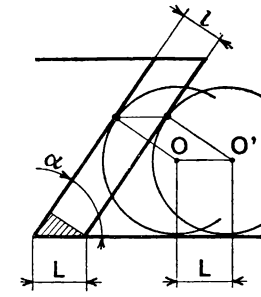


Fig. 103: L'épaisseur du lardon est : $l = L \sin \alpha$

C. PARALLÉLISME D'UN ALÉSAGE ET D'UNE SURFACE PLANE

Lorsqu'on peut faire coïncider la surface plane avec une surface de référence, directement ou par l'intermédiaire de cales de même hauteur, un mandrin monté sans jeu dans l'alésage est palpé au comparateur (fig. 104 - a) qui donne les écarts de parallélisme.

Lorsque la surface plane est de faible largeur accessible, faces **A** et **A'** d'une queue d'aronde, par exemple, on lui substitue une pige cylindrique (fig. 104-**b**). On mesure alors les écarts de cote **e** ou **E** entre les génératrices intérieures ou extérieures de la pige et du mandrin.

Cette deuxième vérification n'a de valeur que si l'alésage est parfaitement parallèle au plan d'appui **P** de la pige. Il faut donc conduire le contrôle en deux temps comme l'indique la figure.

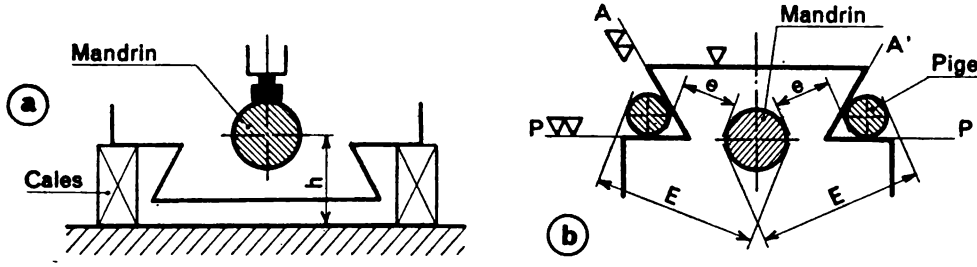


Fig. 104: Vérification du parallélisme d'un alésage et d'une surface plane ⓐ au comparateur, ⓑ à l'aide de piges.

D. PARALLÉLISME DE DEUX ALÉSAGES

Pour le contrôler, il suffit de placer dans chacun des alésages un mandrin sans jeu et de comparer les cotes des écartements intérieurs ou extérieurs des génératrices (fig. 94).

III. — VÉRIFICATION DE LA POSITION ANGULAIRE DES SURFACES

La position angulaire de deux surfaces planes est définie par le rectiligne du dièdre qu'elles forment.

La vérification de cet angle peut se faire :

— par comparaison, ou plus exactement par coïncidence, soit avec un vérificateur à dimension fixe appelé **calibre d'angle**, soit **par projection** sur un tracé de référence ;

— par mesure, avec un vérificateur à lecture directe appelé **rapporteur d'angle**, ou à l'aide d'un **microscope goniométrique**;

— par calcul associé à la mesure d'une cote linéaire sur **piges** ou sur **blocs « micyl »**.

A. VÉRIFICATION PARTICULIÈRE DE L'ANGLE DROIT

Nous avons traité ce problème dans les ouvrages des classes de 4e et de 3e. On opère généralement par coïncidence avec le calibre d'angle : équerre, cylindre de vérification sur marbre ou bloc-vé étalon sur marbre qui présente l'avantage de faire ressortir en même temps le défaut de planéité.

B. VÉRIFICATION DES ANGLES

1° Par coïncidence.

Avec un calibre. **Le calibre d'angle** (fig. 105) préalablement contrôlé par mesure, est de faible épaisseur. En le plaçant suivant le **rectiligne du dièdre,** ou angle plan, on observe le jour qui filtre entre les contacts. La vérification laisse une grande part d'incertitude due à la position incorrecte du calibre et à l'appréciation de l'opérateur.

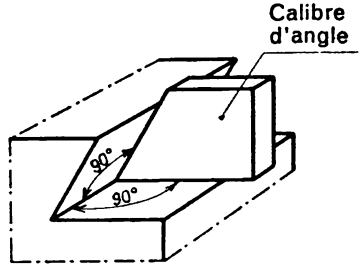


Fig.105: Calibre d'angle en position suivant le rectiligne du dièdre

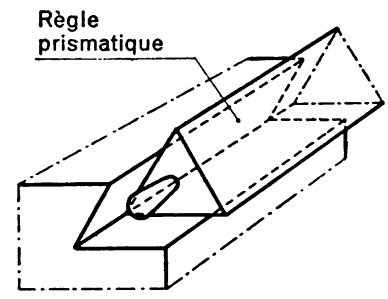


Fig.106: Règle prismatique pour angles de 60°

La règle prismatique (fig. 106) permet à la fois le contrôle de l'angle et de la planéité des surfaces. De plus, le portant au rouge matérialise avec précision le défaut de l'angle.

Le calibre à cône (fig. 107) est commode parce qu'il permet un appui correct de la pièce à vérifier.

Par projection sur un tracé à grande échelle. Le profil de la pièce, comportant l'angle à vérifier, est projeté par un système optique à

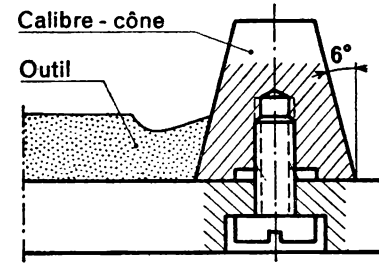


Fig.107: Contrôle de l'angle d'un outil au câlibre - cône

fort agrandissement sur une épure préalablement dessinée. La coïncidence de la projection et de l'épure marque la correction de l'angle.

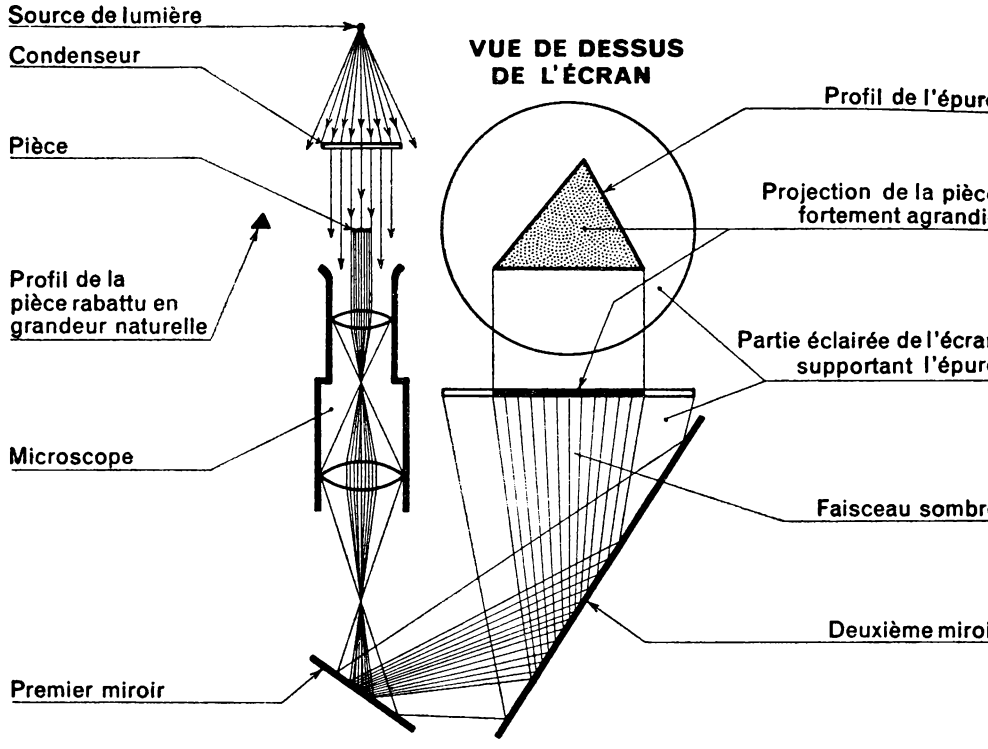


Fig.108: Principe de la projection d'une forme

L'appareil à projeter (fig. 108) comprend un condenseur qui dirige sur la pièce un faisceau de rayons parallèles. L'ombre portée par la pièce vient, après passage dans un microscope, frapper des miroirs qui la renvoient, fortement agrandie, sur l'écran transparent qui porte l'épure. Si le tracé est exécuté avec une précision de 0,2 *mm*, courante pour un bon dessinateur, et si l'agrandissement de l'appareil est de 60, par exemple, la précision de la vérification pourra atteindre $\frac{0,2}{60} \simeq 0,003$ *mm* c'est-à-dire 3μ.

2° Par mesure directe.

Avec le rapporteur. **Le rapporteur ordinaire** muni d'un vernier au soixantième ne permet la lecture des angles que de 5 en 5 minutes.

Le rapporteur sinus (fig. 109) donne le sinus de l'angle vérifié ou, réciproquement, marque l'angle à partir de son sinus. Son champ n'est donc pas limité.

La règle pivotante, enserrée entre deux plaques formant corps, porte un bouton cylindrique de 10 *mm* de diamètre qui s'appuie sur des cales étalons posées dans une lumière du corps. L'inclinaison de la règle dépend donc de l'épaisseur des cales.

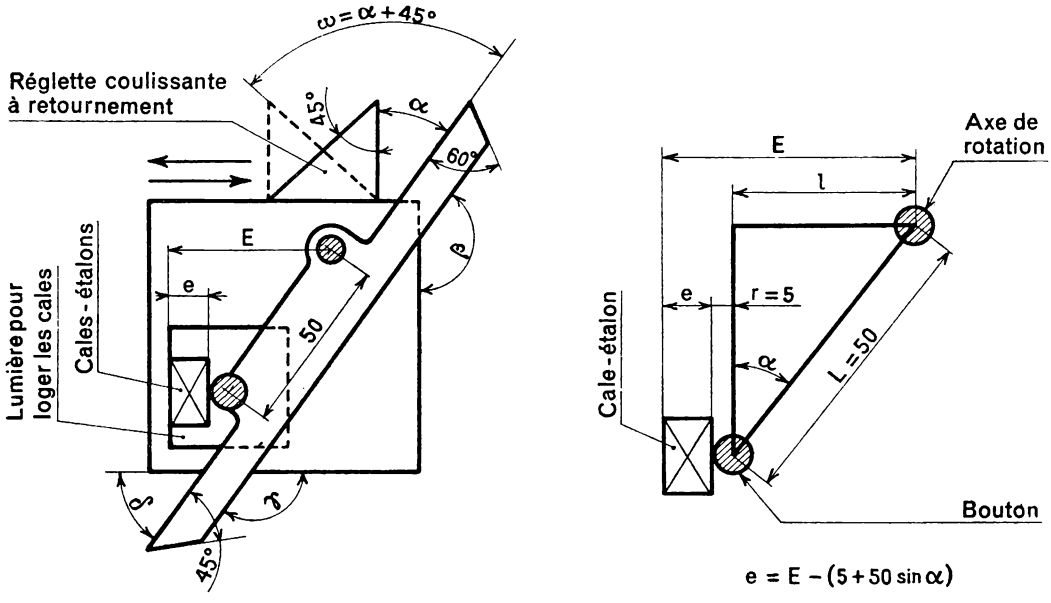


Fig.109: Rapporteur - sinus et son réglage

La distance **E** de l'axe de rotation au fond de la lumière est caractéristique de l'appareil et connue. La distance entre l'axe et le bouton est **L** = 50 *mm* et le rayon du bouton est **r** = 5 *mm*. On peut donc :

— connaissant l'angle α, régler l'appareil en plaçant des cales étalons dont l'épaisseur **e** est calculée par la relation
$\mathbf{e = E - (l + r) = E - (L \sin \alpha + r) = E - (50 \sin \alpha + 5)}$;

— connaissant l'épaisseur **e** des cales étalons en déduire la valeur de l'angle α par la relation : $\mathbf{\sin \alpha = \dfrac{(E - 5) - e}{50}}$.

La rotation de la règle ne dépasse pas 45° mais on remarque (fig. 109) que, à partir de l'angle de base α, le rapporteur sinus donne les angles $\beta = 180° - \alpha$; $\gamma = 90° + \alpha$; $\delta = 90° - \alpha$, ce qui permet d'obtenir tous les angles.

Avec le microscope goniométrique. Le microscope goniométrique (fig. 110) est un appareil de projection dans lequel l'image de l'angle à mesurer vient coïncider avec deux réticules dont on lit l'ouverture angulaire sur un limbe gradué.

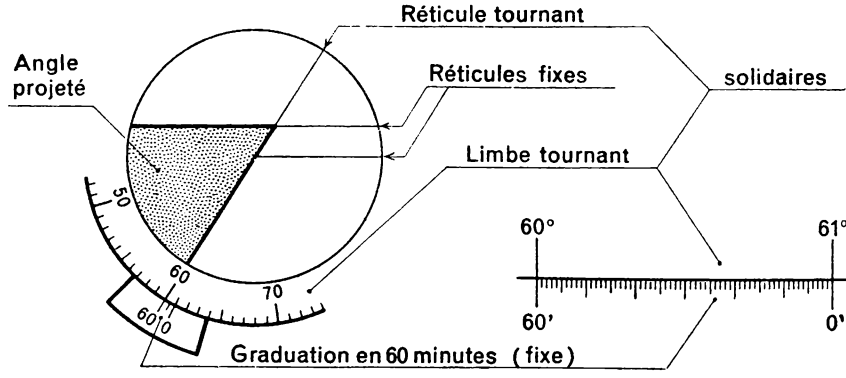


Fig. 110: Ecran d'un microscope goniométrique et son système de graduation. Lecture 60°

L'écran fixe porte un faisceau de réticules parallèles sur lesquels on met en coïncidence un côté de l'angle à mesurer. L'écran mobile porte un autre réticule qu'on amène par rotation sur le deuxième côté de l'angle. Cette rotation entraîne un limbe gradué en degrés qui se déplace en regard d'un limbe gradué en 60′ et solidaire de l'écran fixe. Grâce à une lunette secondaire qui facilite la lecture, on apprécie facilement la demi-minute. La précision est donc de l'ordre de 30″.

3° Par le calcul et par mesure indirecte.

A l'aide de piges cylindriques. Le principe de la mesure d'un angle à l'aide de piges de diamètre connu a été déjà exposé (neuvième leçon, classe de 3e). Nous rappelons donc que pour contrôler un angle connu, il faut préalablement calculer les cotes

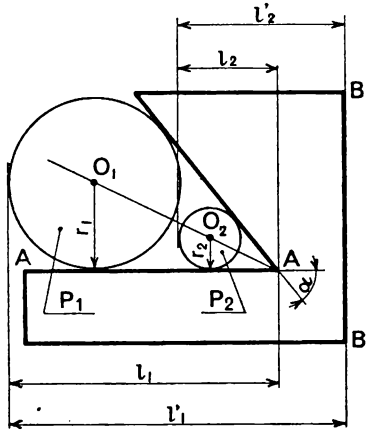


Fig. 111: Contrôle d'un angle à l'aide de piges

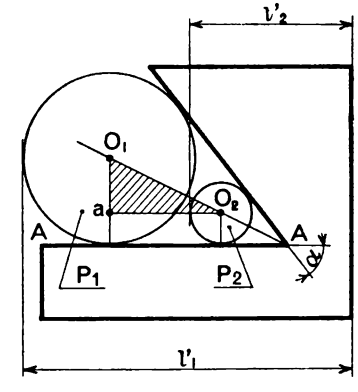


Fig. 112: Mesure d'un angle à l'aide de piges

sur piges correspondantes et que, pour mesurer un angle, il faut en calculer la valeur à partir des cotes sur piges préalablement mesurées.

Dans le cas du contrôle de l'angle (fig. 111) on calcule :

$$l_1 = r_1 \left(1 + \text{cotg} \frac{\alpha}{2}\right) \text{ et } l_2 = r_2 \left(1 + \text{cotg} \frac{\alpha}{2}\right)$$

d'où $l_1 - l_2 = (r_1 - r_2)\left(1 + \text{cotg} \frac{\alpha}{2}\right)$. Comme $l_1 - l_2 = l'_1 - l'_2$ il suffit donc de s'assurer par mesure que :

$$l'_1 - l'_2 = (r_1 - r_2)\left(1 + \text{cotg} \frac{\alpha}{2}\right)$$

Ex : Soient $\alpha = 60°$, $D_1 = 20$ et $D_2 = 6$, il faut :

$$l'_1 - l'_2 = (10 - 3)(1 + 1{,}732) = 19{,}124 \text{ mm}$$

— Dans le cas de la mesure de l'angle (fig. 112) on calcule :

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\overline{o_1 a}}{\overline{a o_2}} = \frac{r_1 - r_2}{\overline{a o_2}} = \frac{r_1 - r_2}{(l'_1 - l'_2) - (r_1 - r_2)}$$ après avoir mesuré les cotes l'_1 et l'_2.

Ex : Soient $l'_1 = 72{,}32$, $l'_2 = 53{,}20$, $D_1 = 20$, $D_2 = 6$

on aura $\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{10 - 3}{(72{,}52 - 53{,}20) - (10 - 3)} = 0{,}577$ d'où $\frac{\alpha}{2} = 30°$ et $\alpha = 60°$

Remarque. Pour que les mesures sur piges soient utilisables, il faut s'assurer que les faces **A A** et **B B** sont parfaitement perpendiculaires.

A l'aide des blocs « micyl ». Le bloc « micyl » est constitué par un demi-cylindre qui reste en contact avec les deux faces en vé d'un support (fig. 113) par l'intermédiaire d'attaches élastiques ou articulées. La face plane du demi-cylindre peut donc prendre une orientation variable sans que son centre **O** se trouve déplacé et, par suite, les cotes **M** et **h** relatives à ce centre **O**, restent constantes et connues (garanties à 0,5 μ près).

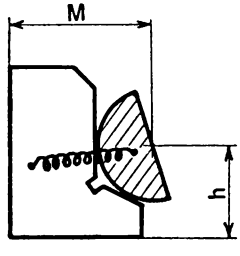


Fig. 113: Bloc « MICYL»

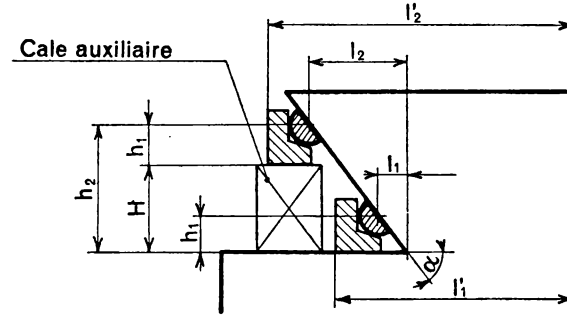


Fig. 114: Contrôle ou mesure d'un angle à l'aide de blocs « MICYL»

Pour les blocs type **A** on a **M** = 7 **h** = 5.
Pour les blocs type **B** on a **M** = 10 **h** = 7.

Exemple d'utilisation (fig. 114) : Soit $\alpha = 60^o$ à contrôler à l'aide de blocs « micyl » dont l'un est porté par une cale $H = 20$.

Les blocs remplacent les piges habituelles et il faut s'assurer que

$$l'_2 - l'_1 = l_2 - l_1 = \frac{h_2}{tg\,\alpha} - \frac{h_1}{tg\,\alpha} = \frac{H + h_1 - h_1}{tg\,\alpha} = \frac{H}{tg\,\alpha}$$

relation qui montre que le calcul est indépendant des cotes des blocs et par suite très simple.

Il faudra donc $l'_2 - l'_1 = \frac{20}{1{,}732} = 11{,}546$ *mm*.

IV. — VÉRIFICATION D'UNE FORME COMPOSÉE D'ÉLÉMENTS PLANS

Supposons que nous ayons à contrôler le calibre à silhouette (fig. 115) dont les faces planes composantes sont limitées aux sommets 0-1-2..... 7-8-9.

Nous pouvons utiliser des appareils de mesure qui nous donneront les distances respectives entre plans parallèles, des équerres à 90°, des piges qui situeront les sommets et permettront la mesure des angles. Mais ces opérations fractionnées seront longues et il faudra ensuite les grouper.

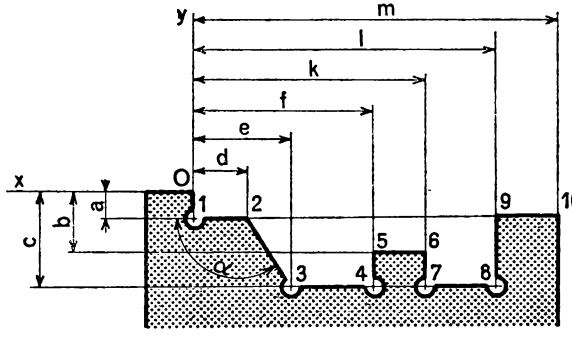


Fig. 115: Cotation d'un calibre à silhouette en coordonnées

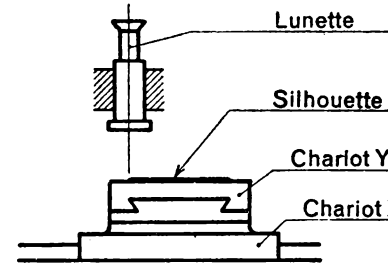


Fig. 116: Mesureur optique avec goniomètre

L'utilisation du **mesureur muni d'un microscope goniométrique** (fig. 116) abrège le contrôle. Il possède en effet deux chariots **X** et **Y** dont les déplacements rectangulaires sont combinés avec la rotation du microscope goniométrique.

La vérification est conduite dans l'ordre suivant (fig. 117).

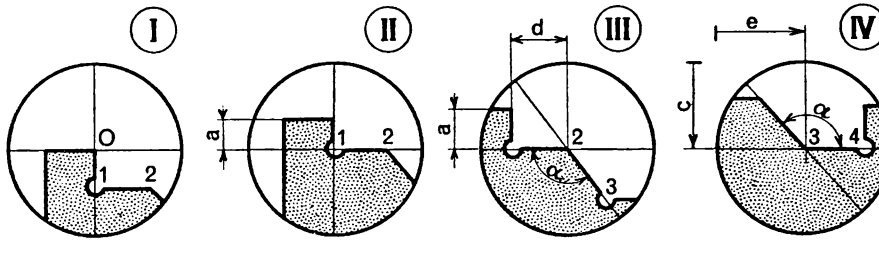


Fig. 117: Exécution du contrôle de la silhouette

I. — La forme étant cotée en coordonnées rectangulaires par rapport à deux axes origines **o x** et **o y** (fig. 115), aligner la pièce par déplacement des chariots **X** et **Y**, de telle sorte que le sommet **O** soit au centre de visée et que les axes **o x** et **o y** soient sur les réticules rectangulaires;

II. — Déplacer le chariot **Y** de la cote **a** (ordonnée) et vérifier la position du sommet 1 et de la face 1-2;

III. — Déplacer le chariot **X** de la cote **d** (abscisse) et vérifier en même temps la position du sommet 2 et de la face 2. 3 (par mesure de l'angle α à l'aide du réticule tournant);

IV. — Déplacer le chariot **X** de la cote **e** (abscisse) et le chariot **Y** de la cote **c** (ordonnée) et vérifier en même temps la position du sommet 3 et de la face 3. 4;

...Continuer ainsi jusqu'au sommet 9 et à la face 9. 10.

Vérification de surfaces particulières

VÉRIFICATION DES FILETAGES

Avant de traiter les procédés de vérification qui sont particuliers aux filetages nous allons définir le contrôle d'une surface hélicoïdale.

I. — CONTROLE DES SURFACES HÉLICOIDALES

A. CARACTÉRISTIQUES

La surface hélicoïdale est définie par **l'hélice directrice** et par le **profil de la surface** (fig. 118).

L'hélice directrice est elle-même définie par le diamètre **D** du cylindre de base sur lequel elle est tracée et par son pas **p.**

La forme du profil est toujours lue dans le plan radial qui contient l'axe de l'hélice. Elle est cotée à partir de l'hélice directrice.

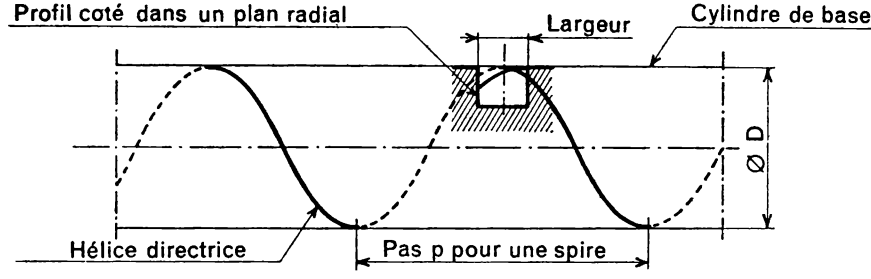


Fig. 118 : Caractéristiques de la surface hélicoïdale

B. GÉNÉRATION

La surface hélicoïdale est généralement obtenue par la combinaison de mouvements illustrés par la figure 119. L'outil a le plus souvent la forme du profil situé dans le plan radial.

C. DÉFAUTS DE LA SURFACE HÉLICOIDALE

En raison de sa génération, nous trouverons dans la surface hélicoïdale les défauts de la surface cylindrique, les défauts de l'hélice directrice et les défauts de profil.

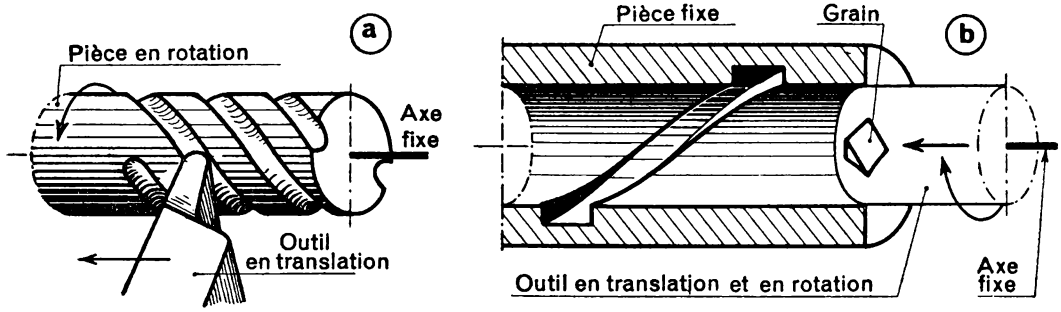
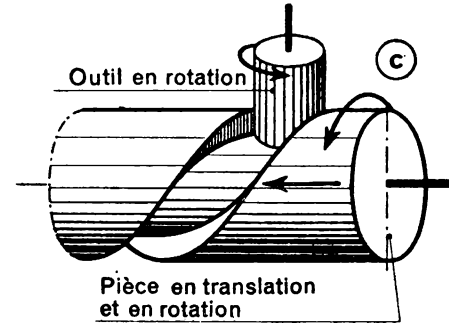


Fig.119: Génération de la surface hélicoïdale :
a) par un mouvement circulaire de la pièce et un mouvement rectiligne de l'outil
b) par un mouvement circulaire et un mouvement rectiligne de l'outil
c) par deux mouvements circulaires et un mouvement rectiligne



L'hélice directrice pourra présenter des variations de pas dues le plus souvent :

— à la mauvaise synchronisation du mouvement circulaire et du mouvement rectiligne;
— à un mauvais maintien de l'outil et de la pièce.

Le profil pourra présenter (fig. 120) :

— des défauts de forme propre dus généralement à la forme de l'outil mal adaptée à sa position de coupe (il n'est plus dans le plan radial);
— des défauts de position par rapport à l'axe de l'hélice dus à un mauvais réglage de l'outil et qui se manifesteront par des écarts de diamètre ou une mauvaise orientation du profil.

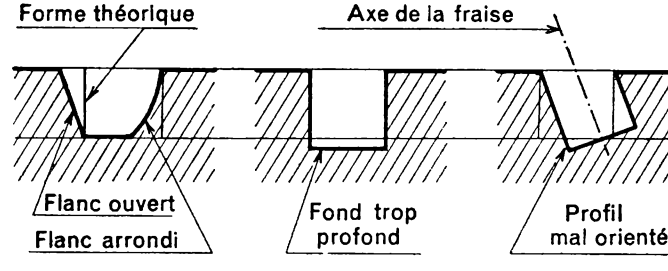


Fig.120: Principaux défauts de profil

D. ADAPTATION DU CONTROLE

En mécanique, la surface hélicoïdale est surtout utilisée :

— comme organe de serrage ou de simple déplacement : visserie, cames à rainure, rampes de coïncement. Elle ne requiert alors que des qualités de résistance et son contrôle se réduira le plus souvent à celui des diamètres de base et quelquefois à la forme propre du profil ;

— comme organe précis de transformation du mouvement : vis mère de tour, vis de table de fraiseuse... Dans ce cas, c'est surtout la constance du pas qui fera l'objet de la vérification ;

— comme organe de mesure : vis micrométriques, vis de chariots de tables de pointage, vérificateur de filetage... Il faudra ici contrôler sévèrement la constance du pas, mais aussi la parfaite correction du profil pour éviter les jeux dus aux usures locales prématurées.

II. — PROCÉDÉS DE CONTROLE DES FILETAGES

Nous nous limiterons au contrôle du filetage au profil triangulaire système international (**S I**) qu'il est d'ailleurs facile d'adapter au profil trapézoïdal normalisé (**T R**) et aux autres profils.

A. CARACTÉRISTIQUES DU FILET S I (fig. 121).

Le profil générateur est un triangle équilatéral tronqué au $\frac{1}{8}$ de sa hauteur au sommet et au $\frac{1}{16}$ de sa hauteur au fond. On en déduit, en fonction du **pas p** et du **diamètre nominal D** (mesuré à l'extérieur du filet de la vis) les cotes de la vis et de l'écrou :

Hauteur théorique du triangle

$$\mathbf{H} = \mathbf{p} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866\ \mathbf{p}$$

Hauteur du contact des filets

$$\mathbf{h} = \mathbf{H} - \left(\frac{\mathbf{H}}{8} + \frac{\mathbf{H}}{8}\right) = 0{,}866\ \mathbf{p} \times \frac{6}{8} = 0{,}65\ \mathbf{p}$$

Profondeur du filet

$$\mathbf{h_1} = \mathbf{H} - \left(\frac{\mathbf{H}}{8} + \frac{\mathbf{H}}{16}\right) = 0{,}866\ \mathbf{p} \times \frac{13}{16}\mathbf{p} = 0{,}7\ \mathbf{p}$$

Diamètre moyen de la vis

$$\Delta = \mathbf{D} - 2 \times \frac{\mathbf{h}}{2} = \mathbf{D} - 0{,}65\ \mathbf{p}$$

Diamètre du noyau de la vis

$$\mathbf{d_1} = \mathbf{D} - 2\ \mathbf{h_1} = \mathbf{D} - 1{,}4\ \mathbf{p}$$

Diamètre de perçage de l'écrou

$$\mathbf{d} = \mathbf{D} - 2\ \mathbf{h} = \mathbf{D} - 1{,}3\ \mathbf{p}$$

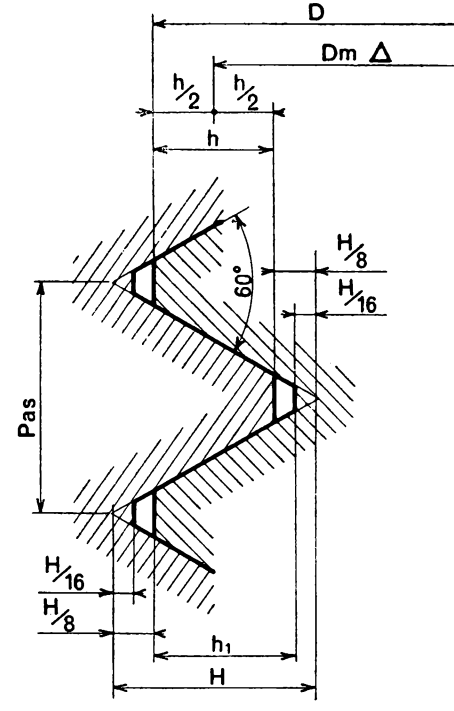


Fig. 121 : Caractéristiques du filet S.I.

B. CONTROLE ORDINAIRE SANS MESURE

On contrôle ainsi les vis et écrous de serrage de qualité ordinaire. On ne demande à ces organes que de se monter sans difficulté et avec un jeu dont l'appréciation est arbitraire.

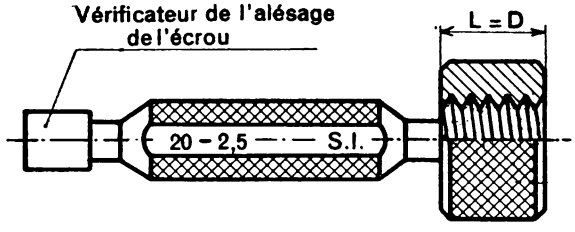


Fig. 122: Bague et tampon filetés pour contrôle simple

Le taraudage est vérifié au **tampon fileté** *entre* qui peut présenter une portée cylindrique lisse destinée au contrôle de l'alésage (fig. 122).

La vis est vérifiée à la **bague filetée** *entre*.

Ce contrôle est long et peu précis et l'usure des vérificateurs est très rapide.

C. CONTROLE A L'AIDE DE CALIBRES A LIMITES

La visserie de qualité moyenne, produite en fabrication série, est vérifiée de telle sorte que son montage soit facile mais aussi que le jeu — qui conditionne la résistance de l'assemblage — reste inférieur à une valeur donnée. On utilise donc des vérificateurs à limites.

1° Bagues et tampons à limites.

La **bague maxi**, qui doit passer, a le profil théorique. La **bague mini** a un profil à sommets fortement tronqués et à fonds très dégagés (fig. 123); elle ne doit pas passer, ce qui garantit la correction des flancs du filet.

Le **tampon mini**, qui doit passer, a le profil théorique et le **tampon maxi**, qui ne doit pas passer, est au profil spécial et assure le contrôle des flancs.

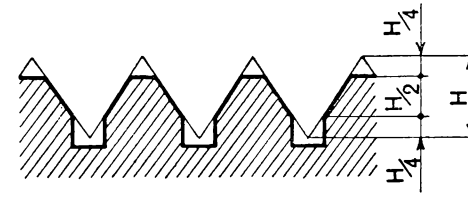


Fig. 123: Profil spécial pour le côté « n'entre pas »

2° Calibres à mâchoires (fig. 124).

Les mâchoires portent des rouleaux striés au profil du filet. Leur engagement sur la vis à contrôler est facile et leur usure est réduite.

Les stries du côté *entre* sont au profil théorique et la longueur des rouleaux est égale au diamètre nominal **D**.

Les rouleaux du côté *n'entre pas* ont le profil spécial limité au contrôle des flancs et ils n'enserrent qu'un seul filet.

Les stries des rouleaux qui se font face sont évidemment décalées latéralement d'un demi-pas et un léger jeu latéral évite le défaut d'alignement.

Le réglage de l'écartement des rouleaux, en fonction du diamètre nominal, est obtenu par la rotation de leur axe excentré par rapport au support.

Certains calibres sont expansibles grâce au glissement des mâchoires dans leur monture. On peut ainsi les régler pour des vis de même pas mais de diamètres différents.

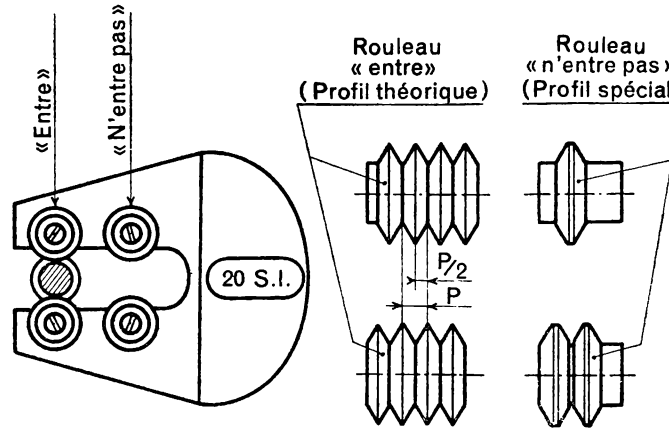


Fig.124: Calibre à mâchoires pour vérification des filetages

D. MESURE DU DIAMÈTRE NOMINAL ET DU DIAMÈTRE MOYEN

Le diamètre nominal **D** est vérifié, comme toutes les surfaces cylindriques, par mesure directe ou à l'aide de calibres maxi-mini, ou encore à l'aide d'un comparateur à touche plane, préalablement étalonné, qui donne les écarts en diamètre.

Le diamètre moyen Δ est mesuré directement au **micromètre à filet** ou indirectement à l'aide de piges.

1° Mesure au micromètre à filet (fig. 125).

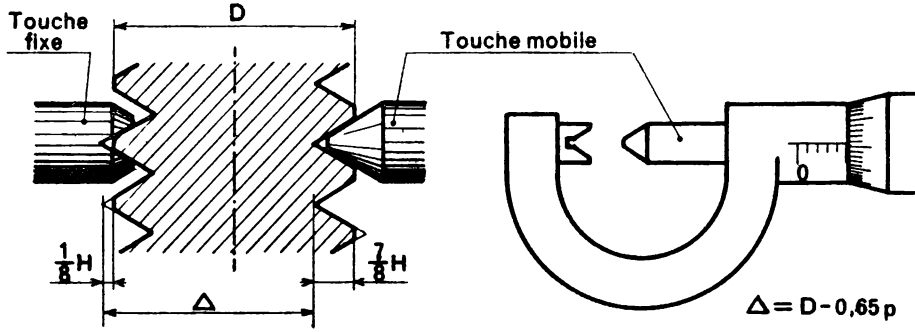


Fig. 125: Micromètre à filet pour mesure du diamètre moyen

Les touches sont adaptés respectivement au creux et au sommet du filet qu'elles enserrent, de sorte que l'examen de la figure permet d'écrire :

$$\Delta = \mathbf{D} + \frac{1}{8}\mathbf{H} - \frac{7}{8}\mathbf{H} = \mathbf{D} - \frac{6\mathbf{H}}{8} = \mathbf{D} - 0{,}866\,\mathbf{p} \times \frac{6}{8} = \mathbf{D} - 0{,}65\,\mathbf{p}$$

La touche en vé, mobile en rotation, s'aligne d'elle-même sur le filet en contact.

Cette mesure ne donne satisfaction que pour les filetages de qualité moyenne.

2° Mesure à l'aide de piges (fig. 126).

Pour les filetages de qualité fine, la mesure sur piges donne une précision acceptable.

Les trois piges ont le même diamètre **d** qui est tel que la pige soit tangente aux deux flancs et à la base théorique du triangle générateur non tronqué. On a alors tangence en **T**, milieu de **a c** et on a $\mathbf{r} = \frac{\mathbf{H}}{3}$ d'où :

$$\mathbf{d} = 2 \times \frac{\mathbf{H}}{3} = \frac{2 \times 0{,}866\,\mathbf{p}}{3} = 0{,}577\,\mathbf{p}$$

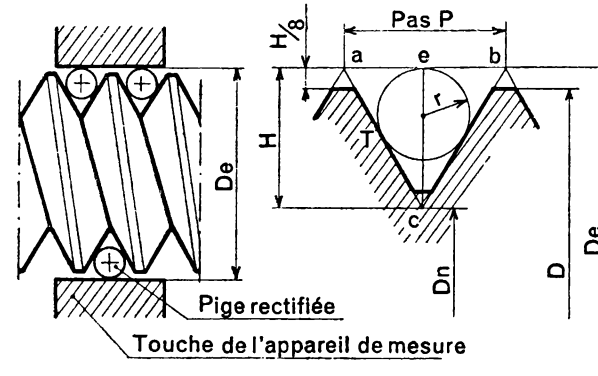


Fig.126: Vérification du diamètre moyen par la méthode des piges

La distance sur pige est donc :

$$\mathbf{De} = \mathbf{D} + \frac{2\,\mathbf{H}}{8} = \mathbf{D} + \frac{2 \times 0{,}866\,\mathbf{p}}{8} = \mathbf{D} + 0{,}216\,\mathbf{p}$$

Lorsque les piges ont un diamètre $\mathbf{d_p}$ différent du diamètre **d** précédent, la distance sur piges est donnée par la relation : $\mathbf{De} = \mathbf{D} - 1{,}515\,\mathbf{p} + 3\,\mathbf{d}$.

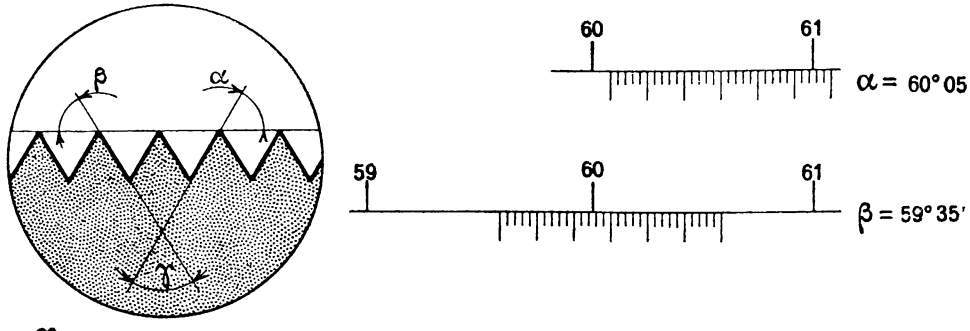
E. CONTROLE DU PROFIL ET DU PAS

Le contrôle sévère du profil et du pas ne se justifie que pour les filetages de qualité fine. On l'associe au contrôle du diamètre nominal et du diamètre moyen traités au paragraphe précédent.

1° Contrôle du profil à l'aide du microscope goniométrique.

Le but est de détecter à la fois les défauts de forme du profil et les défauts de position, asymétrie par rapport à un plan normal à l'axe le plus souvent.

Le mode opératoire est le suivant (fig. 127)



$\gamma = 180° - (\alpha + \beta) = 180° - (60°05' + 59°35') = 180° - 119°40' = 60°20'$

Fig. 127: Contrôle du profil d'un tampon fileté au microscope goniométrique

— aligner les sommets des filets sur le réticule fixe;
— mesurer les inclinaisons α et β des flancs à l'aide du réticule mobile;
— calculer la valeur de l'angle au sommet $\gamma = 180° - (\alpha + \beta)$;
— interpréter le résultat.

Ex : La vérification illustrée par la figure 128 montre :

— que l'angle au sommet $\gamma = 180° - (60° 05' + 59° 35') = 60° 20'$ est trop fort de 20';

— que le profil est asymétrique et couché vers la gauche de :

$$(90° - 59° 35') - \frac{60° 20'}{2} = 30° 25 - 30° 10 = 15';$$

— qu'il y a donc à la fois défaut de profil et défaut de position.

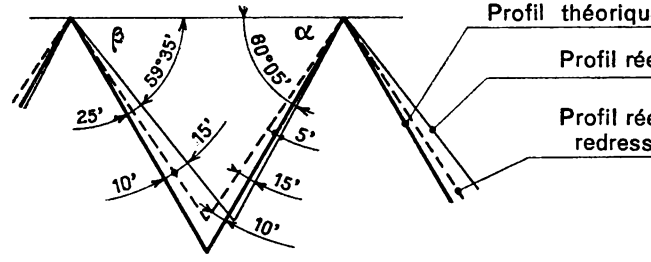
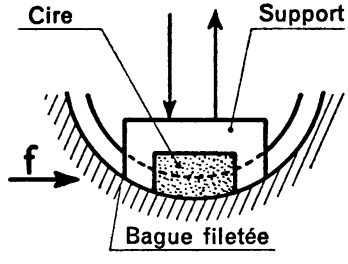
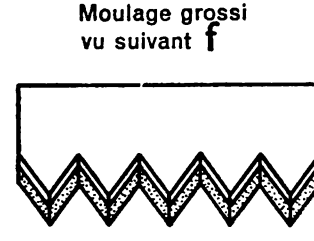


Fig. 128 : Défaut de symétrie. Le filet est « couché » de 15'





La vérification d'un filetage intérieur se fait sur un moulage du filet (fig. 129) en cire molle portée par un support métallique partiellement fileté. On

Fig. 129: Moulage en cire du profil d'une bague filetée

maintient le contact pendant toute la durée du durcissement de la cire et on sort le moulage sans rotation.

2° Contrôle du pas.

a) A l'aide du microscope goniométrique. La pièce filetée est portée par un chariot dont les déplacements longitudinaux sont mesurés avec précision à la cale ou au comparateur. La visée sur les flancs des filets successifs donne les variations du pas. Le porte-pièce est muni d'un diviseur qui permet, par rotations successives de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ de tour, de répéter les mesures suivant 4 ou 3 génératrices.

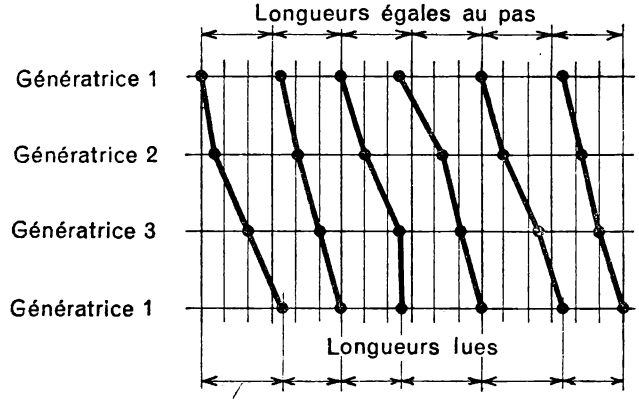


Fig. 130 : Graphique des défauts de pas et de voilage

L'irrégularité de l'hélice directrice du filet apparaît nettement sur le graphique de relevé des mesures du pas (fig. 130) ainsi que le voilage des filets.

b) A l'aide du comparateur L C A (Laboratoire Central d'Armement). L'appareil (fig. 131), préalablement étalonné sur une vis de référence, est dé-

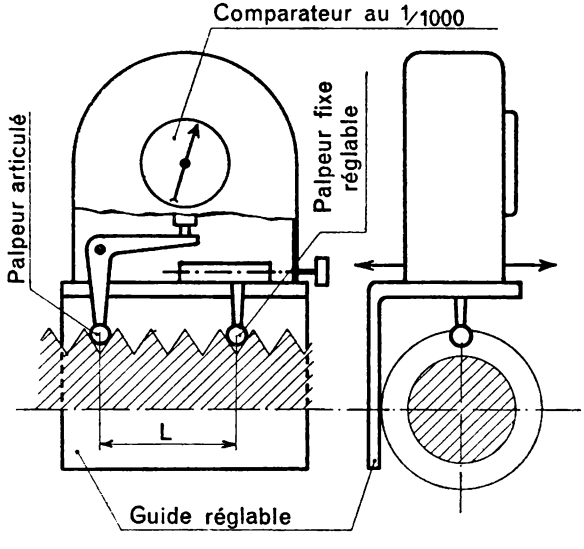


Fig. 131 : Comparateur type L.C.A. pour le contrôle du pas

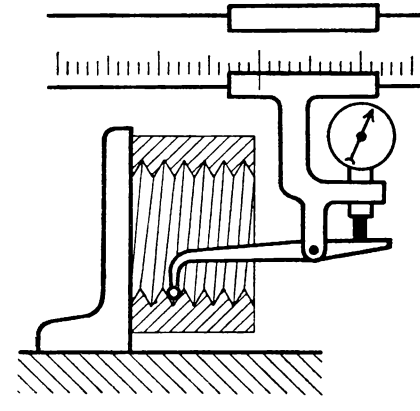


Fig. 132 : Mesure de la constance du pas d'une bague filetée

placé le long de la vis. La variation de la longueur **L** entre les flancs des filets entraîne un déplacement de l'aiguille du comparateur.

Pour le contrôle des écrous ou des bagues filetées, le mesureur (fig. 132) glisse le long d'une règle millimétrique sur laquelle on lit les écarts de pas pour une même lecture de l'aiguille du comparateur dont le palpeur prend appui successivement dans chaque filet.

VÉRIFICATION DES DENTURES D'ENGRENAGES

Etant donné la grande complexité du contrôle des dentures répondant à des besoins particuliers : hélicoïdales, coniques, spirales, corrigées..., nous nous limiterons à l'étude de la vérification des dentures de roues droites à profil en développante de cercle.

I. — DENTURES DROITES EN DÉVELOPPANTE DE CERCLE

A. CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES (fig. 133).

Le profil de la denture est compris entre le cercle de tête et le cercle de pied, le contact des dents se fait sur la droite de poussée **x x** ou de pression, tangente au cercle de base dont le diamètre **D**b dépend du diamètre primitif **D**p et de l'angle de pression normalisé $\alpha = 20^o$.

On a $\mathbf{D}b = \mathbf{D}p \cos \alpha$

Un point de la droite de poussée qui roule sur le cercle de base engendre une développante de cercle, profil de denture le plus usité actuellement.

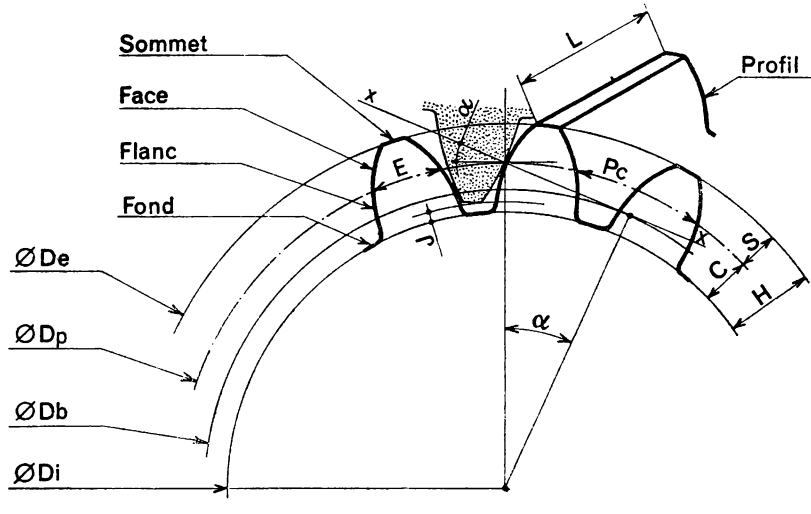


Fig.133: Caractéristiques d'une roue dentée à taille droite

Les éléments qui caractérisent la denture sont définis ci-après :

Z : nombre de dents.

M : module ou pas diamétral. $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{Dp}}{\mathbf{Z}}$ ou encore $\frac{\mathbf{De}}{\mathbf{Z} + 2}$.

Arc **Pc** : pas circonférenciel. $\mathbf{Pc} = \frac{\pi \mathbf{Dp}}{\mathbf{Z}} = \pi \mathbf{M}$.

Arc **E** : épaisseur de la dent. $\mathbf{E} = \frac{\text{arc } \mathbf{Pc}}{2}$.

De : diamètre du cercle de tête. $\mathbf{De} = \mathbf{Dp} + 2\ \mathbf{M}$.

Dp : diamètre primitif. $\mathbf{Dp} = \mathbf{M}\ \mathbf{Z}$.

Di : diamètre du cercle de pied. $\mathbf{Di} = \mathbf{Dp} - 2{,}5\ \mathbf{M}$.

Db : diamètre du cercle de base. $\mathbf{Db} = \mathbf{Dp} \cos \alpha$.

H : hauteur de la dent. $\mathbf{H} = 2{,}25\ \mathbf{M}$.

S : saillie de la dent. $\mathbf{S} = \mathbf{M}$.

C : creux de la dent. $\mathbf{C} = 1{,}25\ \mathbf{M}$.

L : longueur de la dent ; c'est un multiple du module, le plus souvent $\mathbf{L} = 10\ \mathbf{M}$.

J : jeu au fond des dents. $\mathbf{J} = 0{,}25\ \mathbf{M}$.

α : angle de pression ; sa valeur normalisée est de 20°.

Le profil de la dent comprend le sommet, la face, le flanc et le fond.

Le profil de la crémaillère, roue dont le diamètre est infini, se réduit à deux droites faisant entre elles un angle $2\ \alpha = 40°$ (fig. 134).

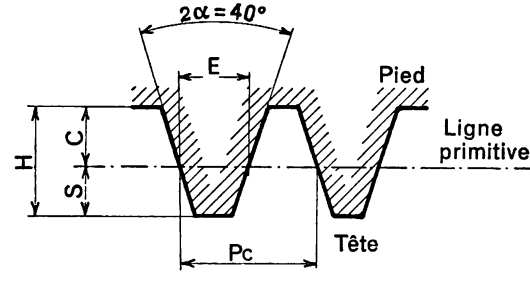


Fig.134 : Dent de crémaillère

B. GÉNÉRATION

Le profil de la denture peut être obtenu par taillage à l'aide d'une fraise de forme, ou **fraise au module**, (fig. 135-a) mais ce procédé peu précis est réservé à la mécanique très ordinaire.

On obtient un profil plus correct en le taillant **par engrènement** avec l'outil lui-même qui peut être :

— un couteau-pignon (fig. 135-b) ;

— une dent de crémaillère (fig. 135-c) ;

— une vis-fraise ou fraise-mère (fig. 135-d).

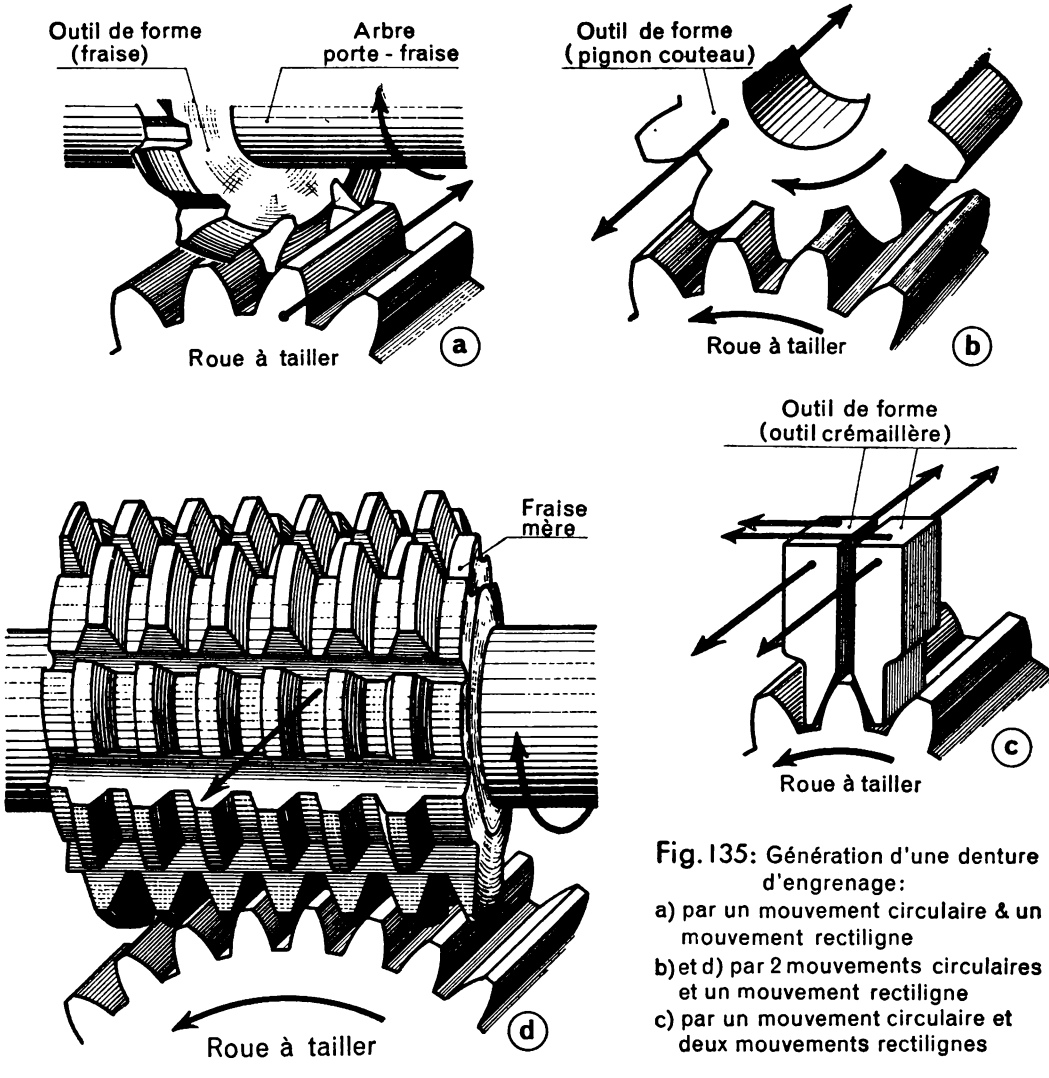


Fig. 135: Génération d'une denture d'engrenage:
a) par un mouvement circulaire & un mouvement rectiligne
b) et d) par 2 mouvements circulaires et un mouvement rectiligne
c) par un mouvement circulaire et deux mouvements rectilignes

C. DÉFAUTS DES DENTURES

Le **profil** peut présenter un défaut de forme lorsqu'il est taillé par une fraise au module, l'outil étant mal centré, mal adapté au nombre de dents ou fortement usé (fig. 136).

En taillage par engrènement le défaut de forme ne peut provenir que de l'incorrection de l'outil, ce qui est très rare.

L'épaisseur de la dent peut présenter des variations dues au manque de rigidité du système pièce et outil ou une **incorrection** due à un mauvais réglage d'enfoncement de l'outil (fig. 137).

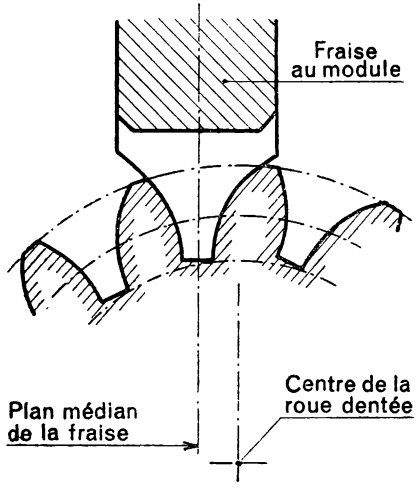


Fig.136: Asymétrie dans le profil

Dent trop maigre
$E < E_1$

Dent trop épaisse
$E > E_1$

Fig.137: Incorrection de l'épaisseur de la dent

Le pas circonférenciel peut présenter des variations dues à la mauvaise synchronisation des divers mouvements générateurs.

Le diamètre primitif, la concentricité de la denture, **le parallélisme** des dents et de l'axe peuvent présenter des écarts dus au mauvais réglage relatif de la pièce et de l'outil.

Ces défauts occasionnent la transmission irrégulière du mouvement par suite des usures locales, des vibrations, des chocs, des coincements, des jeux excessifs.

D. ADAPTATION DU CONTROLE

1° Jeu de fonctionnement.

On ne peut concevoir le fonctionnement d'un engrenage pour lequel la dent d'une roue forcerait entre les dents correspondantes de l'autre roue. Il est donc nécessaire de prévoir et d'obtenir un jeu de denture adapté à la fonction de l'engrenage et en rapport avec le procédé de génération adopté.

On admet en moyenne 4 % du module pour un taillage par génération et 0,8 % du module pour les dentures rectifiées. Ainsi, pour un engrenage devant fonctionner sans bruit et sans à-coups, au module $\mathbf{M} = 4$, on fera suivre le taillage d'une rectification et on admettra un jeu de denture de $\frac{4 \times 0{,}8}{100} = 0{,}032$ *mm* qui se traduira sur chaque roue par une épaisseur de dents sensiblement égale à la moitié du pas circonférenciel diminué de $\frac{0{,}032}{2} = 0{,}016$ *mm*, soit $\mathbf{E} = \frac{3{,}1416 \times 4}{2} - 0{,}016 = 6{,}267$ *mm* et par une largeur de creux correspondante de $6{,}267 + 0{,}032 = 6{,}299$ *mm*.

Pour le même engrenage de mécanique ordinaire, le jeu de $\frac{4 \times 4}{100} = 0{,}16$ *mm* donnerait une épaisseur de 6,20 *mm* et un creux de 6,36 *mm*.

2° Engrenages de mécanique ordinaire.

Etant donné la valeur assez importante du jeu de denture généralement admis, on se contentera de vérifier le diamètre extérieur de la roue et l'épaisseur de la dent au primitif.

3° Engrenages de mécanique soignée.

On exige ici une transmission correcte du mouvement, sans vibrations et sans bruit. Il est donc nécessaire de se livrer, suivant la destination de l'engrenage et dans l'ordre des exigences croissantes, à la vérification :

— des diamètres extérieur et primitif et de la concentricité de la denture ;
— de l'épaisseur de la dent au primitif, compte tenu du jeu admis ;
— de la régularité du pas de la denture ;
— du parallélisme de la denture et de l'axe des roues ;
— du profil de la denture.

II. — PROCÉDÉS DE CONTROLE DES DENTURES D'ENGRENAGES

A. CONTROLE DE LA CONCENTRICITÉ ET DU DIAMÈTRE PRIMITIF

1° Contrôle de la concentricité au comparateur.

La roue dentée munie de son axe est posée sur deux vés (fig. 138). La touche du comparateur s'appuie sur une pige logée successivement dans chaque entre-dents. La vérification à chaque extrémité de la pige indique l'erreur de parallélisme entre la

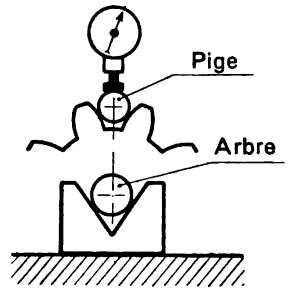


Fig. 138 : Vérification de la concentricité par piges et vés

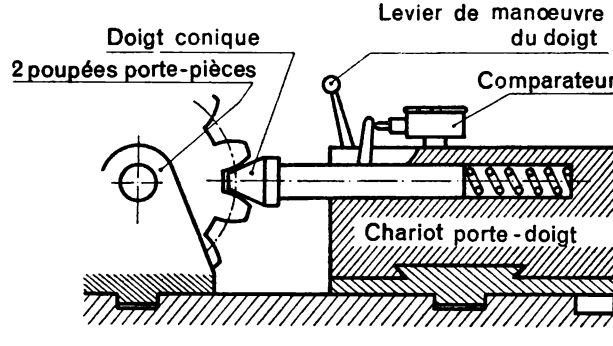


Fig. 139 : Principe de la machine « FELLOWS » pour vérification de la concentricité d'une roue dentée

dent et l'axe. La demi-différence entre les lectures extrêmes — la plus faible et la plus forte — donne la valeur de l'excentricité.

Dans **l'appareil Fellows** (fig. 139), basé sur le même principe, la pige est remplacée par un doigt lié au comparateur et, de plus, le chariot porte-doigt glisse parallèlement à l'axe pour le contrôle du parallélisme.

2° Contrôle de la concentricité et mesure du diamètre primitif.

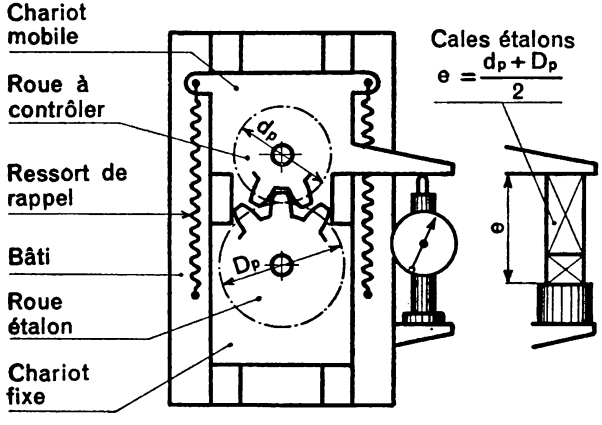


Fig. 140 : Schéma de l'appareil «MAAG» pour contrôle du diamètre primitif et de la concentricité

L'appareil Maag (fig. 140) reçoit une roue étalon montée sur un chariot fixe et la roue à vérifier montée sur un chariot mobile. Des ressorts de rappel assurent le contact des dents. Pendant la rotation des roues, le comparateur indique les écarts pour un **engrènement à fond de dent,** car le chariot mobile suit les irrégularités de la denture. Un style peut d'ailleurs enregistrer ces irrégularités qui marquent le défaut de concentricité.

Si l'on substitue au comparateur un empilage de cales **e** qui donne un écartement des axes assurant un engrènement correct, on en déduit que le diamètre primitif de la roue à vérifier est lui-même correct. On a : $\mathbf{dp = 2\,e - Dp}$.

B. CONTROLE DE L'ÉPAISSEUR DE LA DENT

1° Mesure à l'aide du pied à module ordinaire (fig. 141).

Les becs s'appuient à la hauteur du cercle primitif de sorte que la lecture de règlage verticale **h** est égale à la saillie $\mathbf{s = M}$ augmentée de la flèche de l'arc **E**. L'épaisseur mesurée alors sur l'échelle horizontale est la corde **e** et non l'épaisseur circulaire $\mathbf{E} = \frac{\pi \mathbf{M}}{2}$.

La mesure est imprécise à cause de l'usure rapide des becs et, pour passer de **s** à **h** et de **e** à **E**, il faut utiliser une table d'arcs, cordes et flèches.

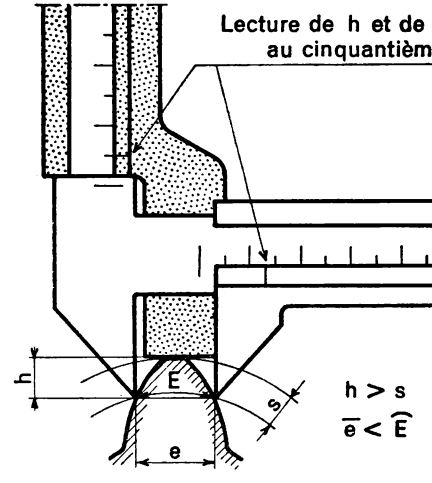


Fig. 141 : Mesure de l'épaisseur d'une dent au pied à module ordinaire

2° Mesure à l'aide du calibre Sikes (fig. 142).

Les deux mâchoires de l'appareil, liées par une vis à pas contraires, constituent un entre-dents de crémaillère qu'on peut règler à volonté en écartement sur une dent étalon au module voulu.

La figure 143 — 1 montre que l'enfoncement plus ou moins grand de l'appareil sur la dent à contrôler se lit sur le comparateur qu'on vient d'étalonner.

Pour une dent normale, on a $\overset{\frown}{\mathbf{b\,b'}} = \overline{\mathbf{a\,a'}} = \frac{1}{2}$ pas. Le segment $\overline{\mathbf{a\,a'}}$ est toujours égal à l'arc $\mathbf{b\,b'}$ auquel il est tangent, de sorte que l'épaisseur circulaire de la dent à vérifier se déduit de l'écart de lecture **e** au comparateur (fig. 143-2).

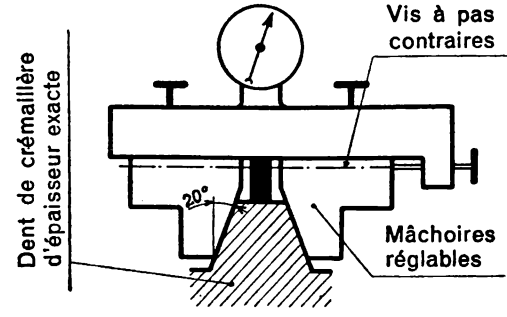


Fig. 142: Appareil «SIKES» et son réglage

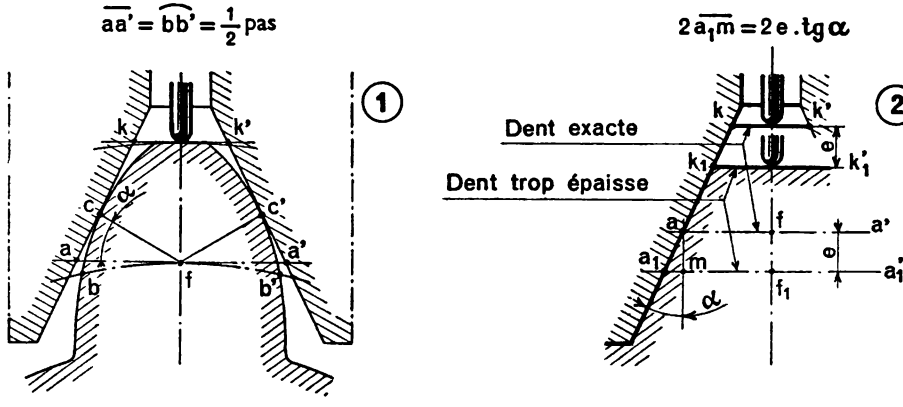


Fig. 143: Comparaison des mesures et relation entre l'écart lu e et l'écart d'épaisseur $2\,a_1m$

On a en effet : $\overline{\mathbf{a_1\,a'_1}} = \overline{\mathbf{a\,a'}} + 2\,\overline{\mathbf{a_1\,m}}$

mais $\overline{\mathbf{a_1\,m}} = \overline{\mathbf{a\,m}}\ \mathbf{tg}\ \alpha = \mathbf{e\ tg}\ \alpha$

d'où $\overline{\mathbf{a_1\,a'_1}} = \overline{\mathbf{a\,a'}} + 2\ \mathbf{e\ tg}\ \alpha$.

L'écart d'épaisseur est égal à $2\ \mathbf{e\ tg}\ \alpha$.

Lorsque le diamètre extérieur présente une erreur de cote égale à δ, il faut évidemment corriger **e** en sens inverse de la valeur $\frac{\delta}{2}$.

3° Mesure à l'aide du vé à coulisse Hispano-Suiza.

Le vé à coulisse est un pied à module dont les becs sont en forme de vé ouvert à l'angle de l'entre-dents de la crémaillère (fig. 144).

La hauteur de la touche $\mathbf{s = M}$ par rapport au cercle primitif se lit sur le vernier vertical. On la corrige au besoin, lorsque le diamètre extérieur de la roue présente une erreur de cote. L'appareil est alors enfourché sur la dent et les becs sont amenés en contact. On lit l'épaisseur sur l'échelle horizontale.

Cet appareil à **mesure directe** permet, au moment du taillage, de règler l'épaisseur **E** en fonction du jeu de denture désiré. Si ce jeu est égal à **j**, il faut que la lecture soit égale à l'épaisseur théorique **E** diminuée de $\frac{j}{2}$.

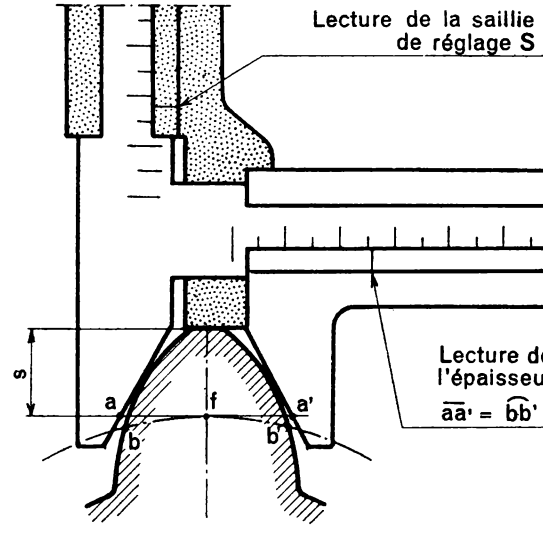


Fig. 144: Mesure de l'épaisseur d'une dent au vé à coulisse

4° Vérification au calibre enserrant plusieurs dents (fig. 145).

La distance **L** entre deux plans parallèles tangents au profil de deux dents d'une même roue est donnée par la relation

$$\mathbf{L = M\,[2{,}9521\ (n - 0{,}5) + 0{,}014\ Z]}$$

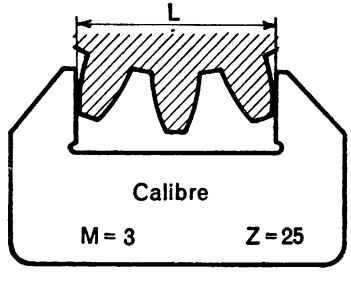


Fig. 145: Vérification sur plusieurs dents

VALEUR DE L'ANGLE DE PRESSION			
$\alpha = 20°$		$\alpha = 14°30'$	
Z	**n**	**Z**	**n**
12 à 18	2	12 à 25	2
19 — 27	3	26 — 37	3
28 — 36	4	38 — 50	4
37 — 45	5	51 — 62	5
46 — 54	6	63 — 75	6
55 — 63	7	76 — 87	7
64 — 72	8	88 — 100	8

Tableau N° I. — *Valeur du nombre de dents* **n** *en fonction du nombre de dents* **Z** *de la roue.*

dans laquelle **M** est le module, **Z** le nombre de dents de la roue et **n** le nombre de dents comprises entre les deux plans parallèles.

La valeur de **n** est donnée par des tableaux. (Voir extrait sur tableau n° 1).

On peut donc, connaissant **L** vérifier l'épaisseur de denture avec un micromètre à touches à plateaux ou avec un calibre à limites.

C. CONTROLE DU PAS OU DE LA DIVISION

A l'aide de l'appareil Maag (fig. 146).

L'appareil s'appuie par deux butées réglables sur le sommet des dents et les touches viennent sur le cercle primitif au contact des profils correspondants de deux dents consécutives. Le comparateur indique les écarts de division relatifs à la corde de l'arc du pas circulaire.

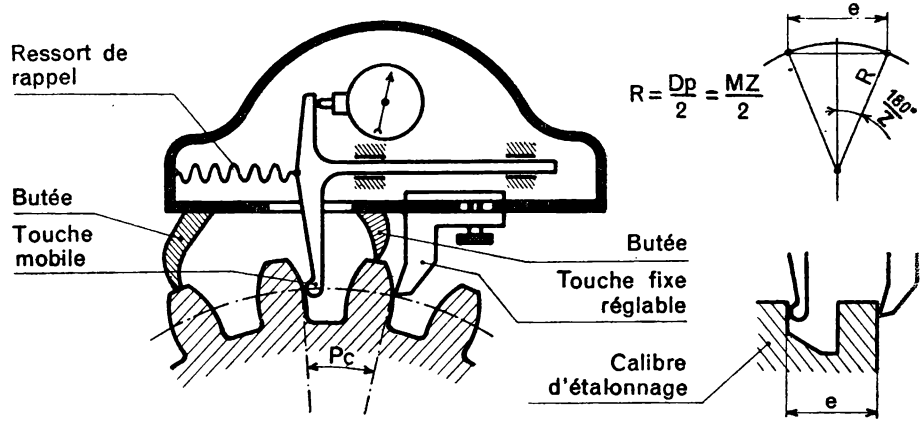


Fig. 146 : Appareil «MAAG» et son réglage pour vérification du pas circulaire

On peut étalonner l'appareil sur un calibre spécial ou sur des cales distantes de $e = 2 \times \frac{Dp}{2} \sin \frac{180°}{Z} = M Z \sin \frac{180°}{Z}$, ou encore sur une roue type.

D. CONTROLE DE LA DISTORSION

La distorsion est une déviation de la dent. Elle se manifeste par un manque de parallélisme avec l'axe (fig. 147-1) ou par un profil incurvé (fig. 147-2).

L'appareil de contrôle Maag (fig. 148-1) comprend un chariot vertical qui glisse parallèlement à

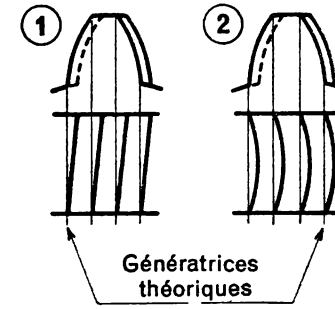


Fig. 147: Exemples de distorsion sur roue à taille droite

l'axe de la roue à vérifier et un comparateur dont le palpeur s'appuie dans l'entre-dents de la roue et enregistre les défauts de distorsion.

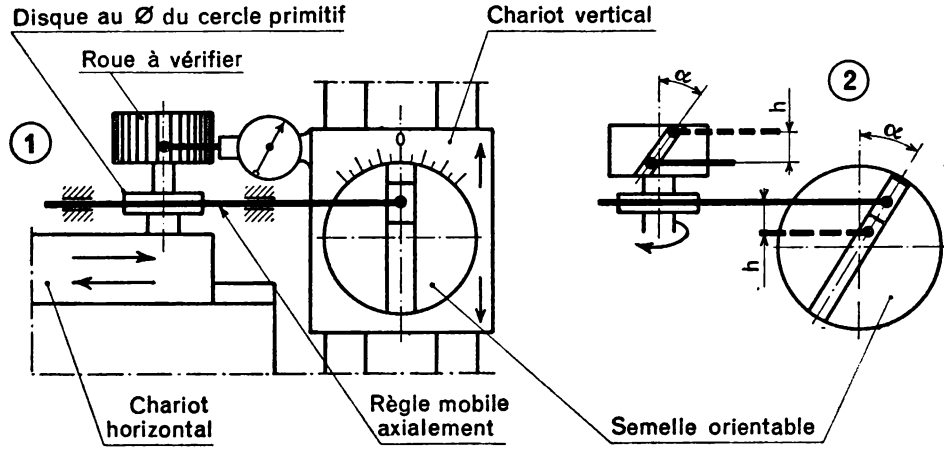


Fig. 148 : Schéma de la machine «MAAG» à vérifier la distorsion des dents

Remarques. — 1° Il ne faut pas confondre le défaut de distorsion et le léger bombé qu'on donne à la dent, sur des machines spéciales, pour localiser le contact avant rodage.

2° L'appareil Maag comprend en outre une règle qui adhère à un disque ayant le diamètre du cercle primitif et qui s'attache à une glissière orientable du chariot vertical. Cette glissière étant inclinée pour les dentures hélicoïdales (fig. 148-2) le déplacement du chariot vertical entraîne un déplacement horizontal de la règle et la rotation de la roue à vérifier sans déplacement du palpeur si le taillage est correct.

E. CONTROLE DU PROFIL

Nous rappelons que la développante de cercle (fig. 149) est engendrée par un point d'une droite qui roule sans glisser sur un cercle.

L'appareil Maag (fig. 150) contrôle le profil par génération. La roue est solidaire d'un disque dont le diamètre est celui du cercle de base. Une règle, solidaire d'un chariot, adhère au disque et le chariot porte un palpeur articulé relié à un comparateur et à un style. Le déplacement du chariot entraîne la rotation de la roue et le palpeur suit un profil en développante exact sans osciller. Toute incorrection est au contraire enregistrée au comparateur et sur une feuille de papier par le style qui trace les variations entre deux traits parallèles correspondant aux tolérances.

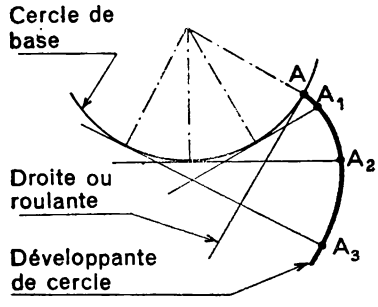


Fig.149: Génération de la développante de cercle

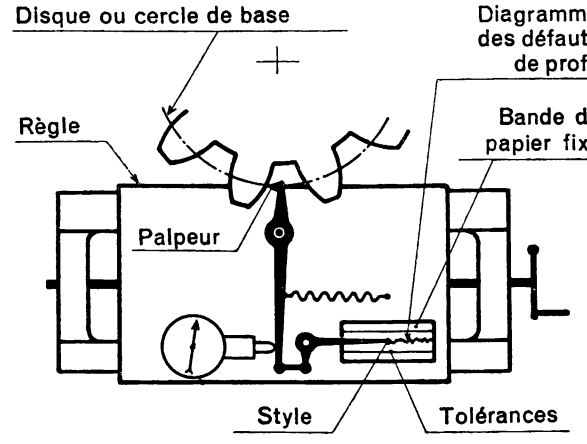


Fig.150: Schéma de principe de l'appareil «MAAG» pour contrôle du profil en développante de cercle

VÉRIFICATION DES CANNELURES

Nous rappelons que les cannelures sur arbres et sur moyeux sont définies par la norme NF-E-22-131- qui fixe le nombre **n** de cannelures, le diamètre intérieur **d**, le diamètre extérieur **D** et leur largeur **B** (fig. 151).

On peut obtenir le centrage par le diamètre intérieur **d** en ménageant un jeu sur le diamètre extérieur et un dégagement à la base des languettes de l'arbre, ou bien par le diamètre extérieur **D** en ménageant un jeu sur le diamètre intérieur.

Le contrôle portera donc sur l'un ou l'autre des diamètres selon le mode de centrage et sur la largeur et la position des cannelures.

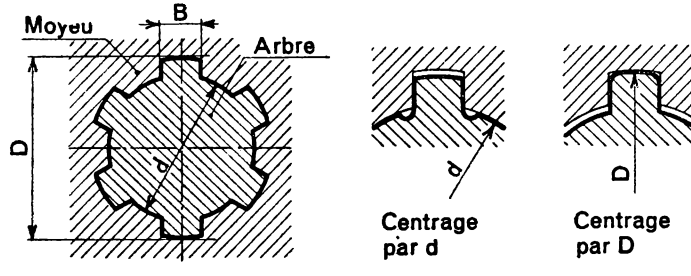


Fig.151: Caractéristiques et centrage des arbres et moyeux cannelés

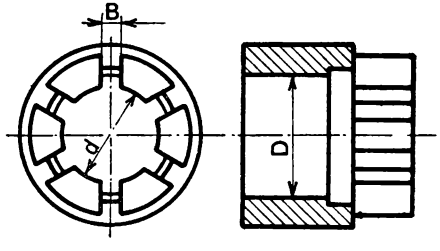


Fig.152: Bague cannelée

A. CONTROLE DE LA CERTITUDE DU MONTAGE

Pour que le montage de l'arbre dans le moyeu soit obtenu sans difficultés, il faut que l'un et l'autre s'inscrivent dans une forme limite.

On utilise donc pour l'arbre une bague

cannelée ayant des dimensions au plus égales aux cotes nominales (fig. 152) et, pour le moyeu, un tampon cannelé à des dimensions au moins égales aux cotes nominales (fig. 153).

Bagues et tampons peuvent être doubles de façon à imposer pour chaque forme géométrique des limites maxi et mini et, par suite, un jeu normal de montage. Il faut alors, pour le contrôle d'un moyeu cannelé, par exemple, un tampon double cannelé maxi-mini pour la largeur des cannelures, un tampon double cannelé pour le diamètre extérieur, un tampon lisse double pour le diamètre intérieur. Leur emploi ne se justifie que pour des conditions exceptionnelles de fonctionnement.

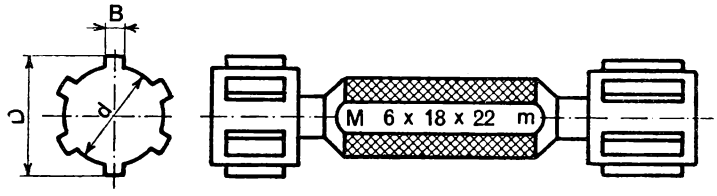


Fig.153: Tampon cannelé double

B. CONTROLE DE LA CORRECTION GÉOMÉTRIQUE

Il est bon, en fabrication série, au moment du réglage de la machine de prélever quelques pièces et d'opérer le contrôle des éléments de contact, sur l'arbre en particulier. Le moyeu est généralement obtenu par brochage et le passage du tampon est une garantie suffisante.

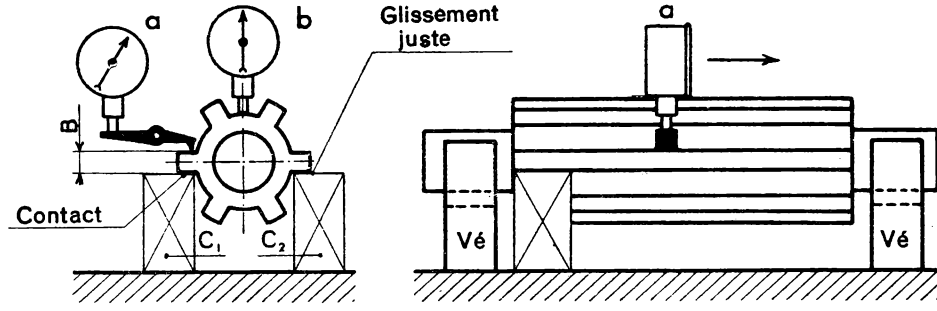


Fig.154: Contrôle de l'épaisseur et de la rectitude des cannelures, de la division et de la concentricité d'un arbre cannelé

L'arbre est posé sur deux vés par ses portées cylindriques (fig. 154). Deux cales C_1 et C_2, de même hauteur, s'ajustent respectivement sous deux languettes opposées et le comparateur est étalonné sur l'une d'elles, C_1 par exemple. Le glissement du comparateur en **a** fait apparaître simultanément l'erreur de largeur de la cannelure **B** et le défaut de parallélisme avec l'axe. Toute erreur de division des cannelures est mise en évidence par un jeu ou un forcement de la cale C_2. Enfin, la concentricité est contrôlée au comparateur, en **b**, pour le diamètre intérieur ou le diamètre extérieur suivant le mode de centrage adopté.

VÉRIFICATIONS MICROGÉOMÉTRIQUES

I. — INFLUENCE DES DÉFAUTS MICROGÉOMÉTRIQUES

Le défaut microgéométrique se manifeste surtout sous la forme d'un sillon laissé par l'outil générateur de la surface. Dans le cas d'un outil simple, les sillons, régulièrement espacés, correspondent à la forme du bec de l'outil (fig. 155); dans le cas d'un outil multiple, fraise par exemple, ils sont moins profonds, l'avance par dent étant faible et le rayon de la fraise généralement plus grand que le rayon du bec d'un outil simple; dans le cas d'une rectification, ils sont marqués d'une manière assez désordonnée; enfin dans le cas d'un rodage ou de superfinition, ils n'apparaissent qu'à peine.

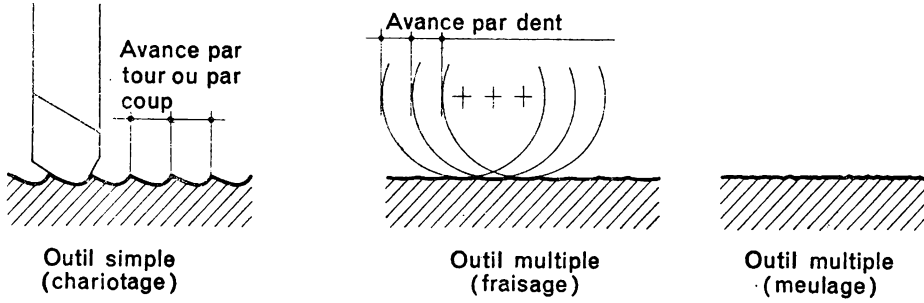


Fig. 155 : Formes de défauts microgéométriques

Lorsque deux surfaces sont en contact, il y a pression réciproque de l'une sur l'autre. Si elles sont immobiles, la pression peut provoquer l'écrasement des crêtes des défauts microgéométriques mais cet inconvénient est généralement sans conséquences. Si les surfaces sont en mouvement, les aspérités s'estompent plus ou moins rapidement par usure, ce qui provoque l'apparition d'un jeu de fonctionnement pouvant devenir inacceptable et un entraînement de métal pouvant aller jusqu'au grippage (fusion locale par échauffement).

La caractéristique des fabrications mécaniques actuelles est l'interchangeabilité mais cet avantage est aussi une servitude en ce sens que les pièces n'étant pas essayées puis ajustées les unes sur les autres, l'homogénéité de fonctionnement n'est obtenue que par un plus grand fini des surfaces de contact. Considérons en effet un assemblage arbre et alésage de diamètre 60 H 6 g 5. La tolérance sur alésage est $\begin{matrix}+\ 0{,}019\\+\ 0{,}00\end{matrix}$, la tolérance sur arbre est $\begin{matrix}-\ 0{,}010\\-\ 0{,}023\end{matrix}$. Le jeu moyen désiré pour un fonctionnement correct est de 26 μ, le jeu minimum non souhaitable est de 10 μ et le jeu maximum, presque inacceptable est de 42 μ. Si l'arbre est obtenu par chariotage de finition à la cote moyenne théorique

59,9835 *mm* et si les sillons ont une profondeur de 20 μ, leur disparition au bout d'un temps de marche réduit augmentera le jeu de fonctionnement de $20 \times 2 = 40$ μ (fig. 156). En supposant que l'alésage moyen du coussinet, soit 60,0095 *mm*, ne subisse aucune usure, le jeu total sera $40 + 26 = 66$ μ, c'est-à-dire plus de 1,5 fois le jeu maximum admis à l'origine. La qualité de l'ajustement H 6 g 5, excellente en principe, ne sera donc pratiquement pas conservée. Par suite le fini de la surface, c'est-à-dire son état microgéométrique, doit varier dans le même sens que la qualité de l'ajustement.

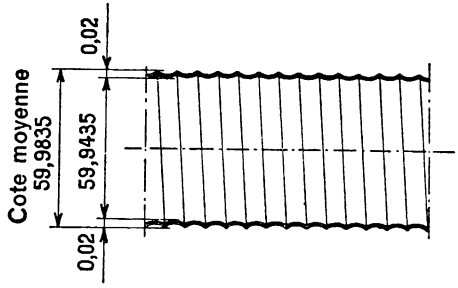


Fig.156: Sillons très grossis laissés par chariotage

Enfin, la métrologie, en raison des exigences des fabrications interchangeables homogènes, requiert des instruments qui conservent longtemps leurs qualités de précision. Il importe donc que leurs surfaces mesurantes se rapprochent le plus possible du parfait, c'est-à-dire qu'elles soient exemptes de tout défaut microgéométrique.

II. — MESURE DES DÉFAUTS MICROGÉOMÉTRIQUES

A. MESURE A L'AIDE DU PALPEUR PNEUMATIQUE « SOLEX NICOLAU » (fig. 157).

Le gicleur de sortie du comparateur Solex débouche à l'intérieur d'une couronne circulaire plane de faible diamètre (3 *mm*) servant de palpeur. La différence de niveau entre gicleur et palpeur **e**, très faible (environ 10 μ) laisse une section d'écoulement égale à π **d e** lorsque le palpeur repose sur un plan parfait. Si la surface présente des aspérités, la section d'écoulement augmente, elle devient π **d** (**e** + **hm**) et la colonne manométrique enregistre la dépression sous la forme de la hauteur moyenne **hm** des défauts microgéométriques.

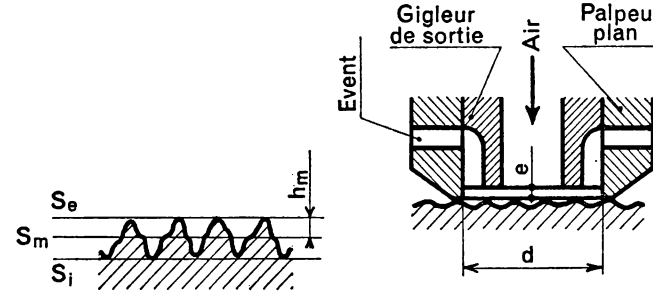


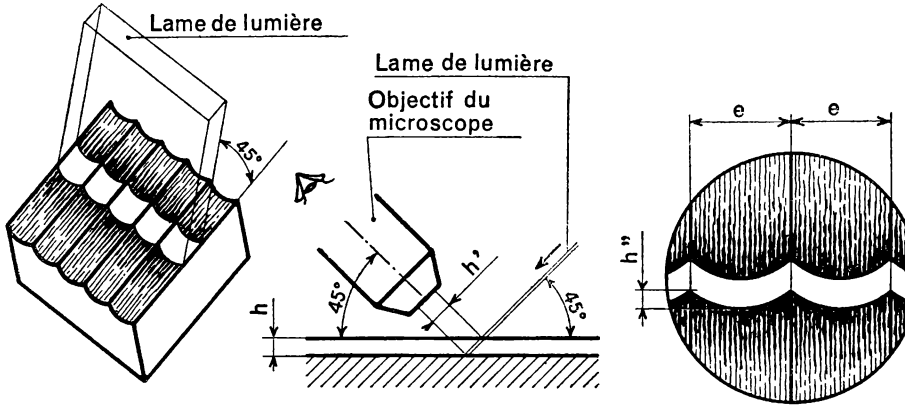
Fig.157: Hauteur moyenne des défauts et leur mesure sur surface plane au palpeur Solex-Nicolau

B. MESURE PAR MICROTOPOGRAPHIE OPTIQUE

1° A l'aide du microscope Zeiss (fig. 158).

L'appareil projette une lame de lumière inclinée à 45° sur la surface à contrôler et le microscope observe la zone éclairée perpendiculairement au faisceau lumineux. Il

s'ensuit que la hauteur du défaut microgéométrique **h** apparaît sur le réticule micrométrique de l'objectif suivant $\mathbf{h'} = \mathbf{h}\sqrt{2}$.



Eclairage de la surface Observation de la surface Vue dans la lunette

Fig. 158 : Mesure des défauts microgéométriques à l'aide du microscope «ZEISS»

En admettant un grossissement de la lunette égal à 300 et une hauteur des rugosités $\mathbf{h} = 5\ \mu$, on l'observera dans la lunette sous une hauteur

$$\mathbf{h''} = 300\,\mathbf{h'} = 300\,\mathbf{h}\sqrt{2} = 300 \times 0{,}005 \times 1{,}414 = 2{,}121\ mm$$

De plus, si l'écartement des crêtes vu dans la lunette est $\mathbf{e} = 30\ mm$, c'est qu'il est sur les pièces de $\frac{\mathbf{e}}{300} = \frac{30}{300} = 0{,}1\ mm$.

2° A l'interféromètre (fig. 159).

Nous rappelons que le phénomène d'interférence fait apparaître sur la surface à contrôler une série de franges sombres et de franges claires et que la dénivellation entre deux franges correspondantes espacées de **d** est égale à la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$ de la lumière utilisée.

Lorsque les franges présentent des décrochements, la surface observée est rugueuse et la largeur **e** du décrochement est l'image du défaut microgéométrique. Pour mesurer sa hauteur **h**, on évalue le rapport entre **e** et **d** et, puisqu'une hauteur de $\frac{\lambda}{2}$ correspond à **d**, on a $\mathbf{h} = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\mathbf{e}}{\mathbf{d}}$.

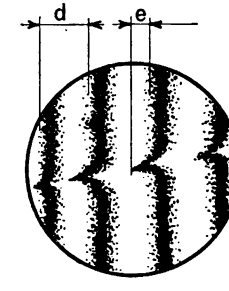


Fig. 159 : Mesure des défauts microgéométriques à l'interféromètre

En supposant qu'on utilise la lumière monochromatique rouge dont la longueur d'onde est $\lambda = 0{,}70\ \mu$ et que le décrochement $\frac{e}{d}$ soit de $\frac{1}{3}$, le défaut aura une hauteur $h = \frac{0{,}7}{2} \times \frac{1}{3} = 0{,}11\ \mu$.

C. MESURE ÉLECTRIQUE A L'AIDE DU RUGOSIMÈTRE

Si on considère un circuit électrique fermé par un cristal piézo-électrique, toute déformation mécanique du cristal (flexion ou torsion) engendre une tension entre les faces métallisées. La variation de tension, très amplifiée, est enregistrée par un voltmètre. Il y a donc corrélation entre la déformation mécanique et l'indication du voltmètre.

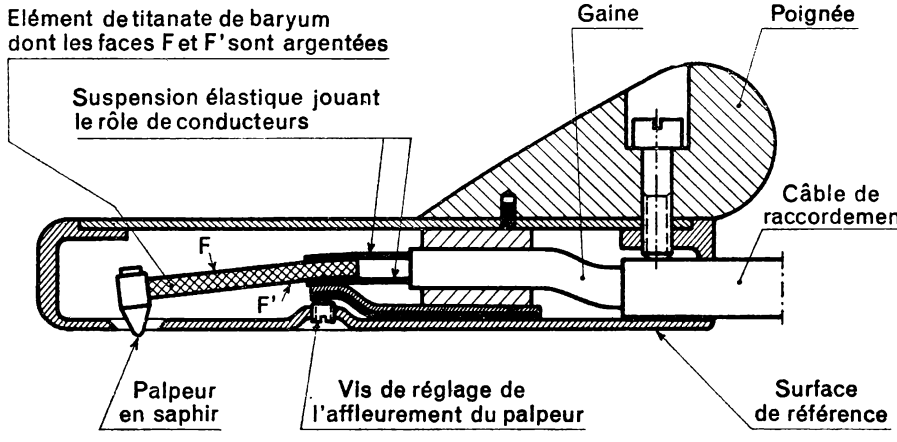


Fig.160: Schéma simplifié du rugosimètre « PHILIPS »

Le rugosimètre Philips (fig. 160) porte un palpeur terminé par un saphir sphérique de 60 μ de rayon qui peut explorer les défauts de la surface à contrôler. L'élément piézo-électrique (titanate de baryum par exemple) se déforme suivant l'amplitude du défaut. Le voltmètre est étalonné d'après des surfaces types (rectifiées, rodées) livrées avec l'appareil. Le capteur qui porte le palpeur peut pénétrer dans un trou de 8 *mm*. Il se prête donc à toutes les vérifications avec facilité mais sa précision n'est assurée que si sa vitesse de déplacement est assez grande : 5 à 10 *cm/s*.

Cet appareil est d'une manipulation très commode et rapide et on peut l'utiliser en cours d'usinage. Muni d'un enregistreur, il peut donner le diagramme de l'état de surface.

ORGANISATION DU CONTROLE

I. — NÉCESSITÉ DU CONTROLE

La livraison de tout organe mécanique au commerce, ou tout simplement au poste de montage, suppose que les conditions de résistance, de durée et de fonctionnement de l'organe sont satisfaites. Or, ces conditions ne peuvent se traduire que par le respect de certains critères : dimensions, formes, caractéristiques mécaniques, chimiques..., etc..., tous mesurables.

L'aptitude à l'emploi requiert donc en fait la mesure des éléments susceptibles de la garantir et l'élimination systématique de tout ce qui n'est pas conforme aux spécifications.

De cette conclusion découlent deux nécessités : celle du contrôle systématique capable de reconnaître les éléments corrects et celle de l'homogénéité de fabrication capable de supprimer totalement les rebuts.

II. — CONTROLE COMPLET

Le contrôle doit normalement s'appliquer tout au long du cycle de fabrication, depuis la matière première dans son état brut jusqu'à la phase finale de livraison du produit.

Il portera donc, par exemple :

— sur les caractéristiques mécaniques de la matière première, sur ses aptitudes à subir les traitements thermiques, avant que commence la fabrication ;
— sur les nouvelles caractéristiques mécaniques après chaque traitement thermique ;
— sur les dimensions et l'état de surface après chaque phase d'usinage ;
— sur le fonctionnement du mécanisme après montage de tous les éléments constitutifs ;
— sur la façon dont il se comporte dans les conditions limites d'utilisation, par le passage au banc d'essai.

Nous n'envisagerons ici que le contrôle dimensionnel.

III. — SYSTÈMES DE CONTROLE DIMENSIONNEL

A. CONTROLE TOTAL

Chaque pièce du lot mis en fabrication est contrôlée après chaque opération d'usinage. Il y a donc garantie absolue de la conformité aux spécifications imposées.

Ce système, évidemment onéreux et lent, ne peut s'appliquer qu'aux petites séries. Il s'impose lorsque la qualité de l'usinage dépend surtout de l'habileté de l'opérateur.

Un alésage exécuté au tour, en plateau et à l'outil, par exemple, ne sera correct que s'il est parfaitement centré par rapport aux faces d'appui de la pièce et si le réglage de l'outil est répété à chaque opération. L'influence de l'opérateur sera donc certaine et le contrôle total sera nécessaire.

B. CONTROLE PARTIEL

Un certain pourcentage seulement du lot (10 % par exemple) **subit le contrôle et on admet que le résultat s'applique à la totalité.** On opère donc sur des prélèvements faits au hasard.

Le contrôle partiel s'applique aux grandes séries pour lesquelles la qualité du travail est indépendante de l'habileté de l'ouvrier. La machine et l'outillage assurent d'eux-mêmes l'homogénéité de fabrication.

Une pièce alésée au tour, en plateau, sera toujours parfaitement centrée si elle est placée dans un montage d'usinage. La dimension de l'alésage sera dans les limites si le calibrage est obtenu à l'alésoir machine guidé par un canon (bague guide). Le contrôle n'aura donc pour but dans ce cas que de déceler une déformation accidentelle du montage d'usinage, un mauvais ablocage de la pièce, ou l'usure de l'alésoir par exemple. On pourra donc se contenter du contrôle partiel.

C. CONTROLE AUTOMATIQUE ET SELF-CONTROLE

Il est assuré par un dispositif qui fait partie intégrante de la machine de production et qui, en agissant sur son réglage, l'empêche de produire des rebuts.

Le réglage se trouve en effet altéré par :

a) La dispersion propre à la machine provenant de son manque de fidélité dans la reproduction de la même cote sur toutes les pièces d'une même série sans qu'aucun élément de travail ne soit modifié.

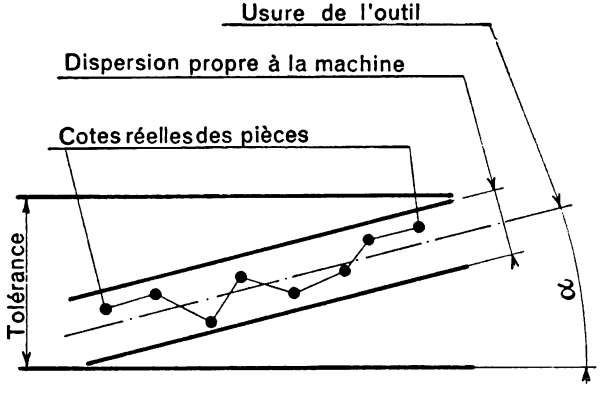


Fig.161: Graphique de variation des cotes

Cette dispersion (fig. 161) est figurée graphiquement par deux droites parallèles qui enserrent les points représentatifs des cotes réelles des pièces mesurées.

b) L'usure de l'outil qui provoque, sans qu'aucun élément de travail ne soit modifié, l'augmentation des dimensions d'un contenu (arbre) et la diminution des dimensions d'un contenant (alésage). Cette usure (fig. 161) est figurée graphique-

ment par l'inclinaison de la droite qui contient les points représentatifs moyens des cotes réelles des pièces mesurées.

La dispersion propre à la machine et l'usure de l'outil en se combinant ne doivent pas porter les cotes réelles en dehors des limites de la tolérance. Il est donc nécessaire de rendre le réglage de la machine indépendant de chacun de ces éléments de variation de la cote réelle, ce qui revient à le lier au contrôle.

1° Réglage lié au contrôle de la dispersion.

Le contrôle de la dispersion est fait par rapport à la ligne moyenne représentative de la cote réelle (fig. 162) correspondant elle-même à une cote que l'on peut matérialiser par une butée. Le contrôle se réduit donc au réglage de la position de l'outil par rapport à la butée, à la condition de supposer nulle l'usure de l'outil. C'est ce que permet le vernier pneumatique.

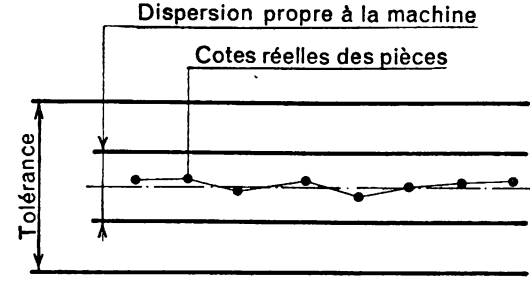


Fig.162: Diminution de la dispersion avec usure de l'outil supposée nulle

Principe du vernier pneumatique Solex (fig. 163).

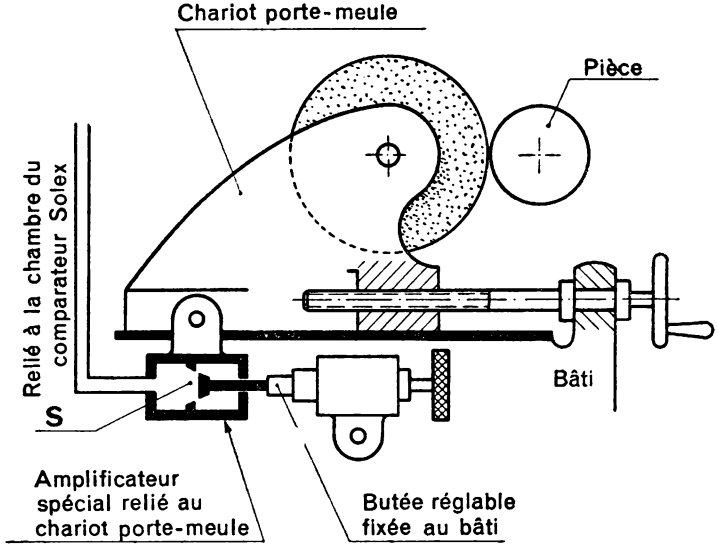


Fig.163: Schéma de principe et de fonctionnement du vernier pneumatique Solex

Le chariot porte-meule entraîne avec lui un amplificateur spécial dont le diaphragme se trouve fermé par la soupape fixée à la butée réglable du bâti lorsque la cote moyenne désirée est atteinte. A ce moment, la pression dans le tube manométrique est maximum.

Ainsi, l'enfoncement de la meule commandé par l'ouvrier, provoque la montée rapide de la colonne manométrique lorsque le passage de section **S** se ferme, puis sa descente lorsque cette

section augmente après dépassement du serrage optimum. L'ouvrier, en surveillant la colonne, peut donc arrêter l'enfoncement de la meule au moment où l'amplification du déplacement est maximum, c'est-à-dire avec une grande précision.

2° Réglage lié au contrôle de la cote.

L'usure de l'outil provoque le déplacement de la cote moyenne. Il faut donc compenser l'usure par un réglage en cours d'usinage suivant étroitement le contrôle.

La jauge Arnold (fig. 164), maintenue en place par une suspension articulée, porte 3 touches dont l'une mobile est reliée à un amplificateur à soupape **Solex** qui donne les écarts de cote en diamètre et guide l'intervention de l'ouvrier.

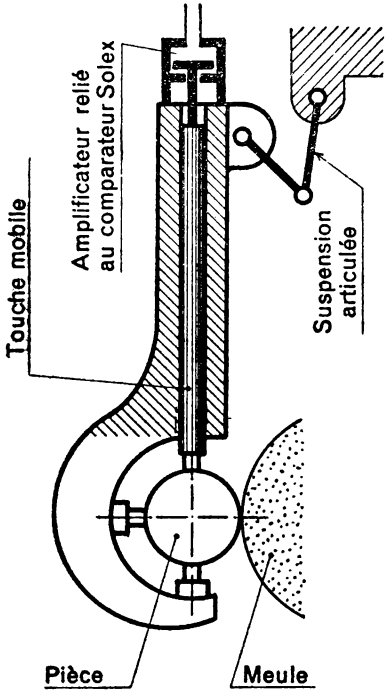


Fig.164: Schéma de la jauge Arnold

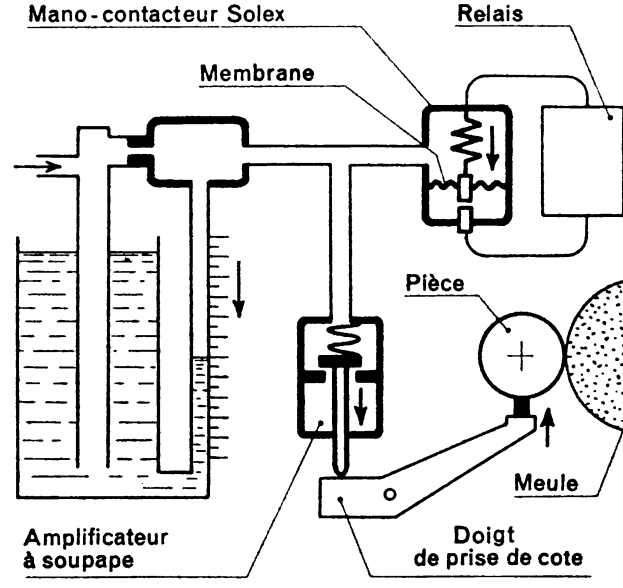


Fig.165: Schéma de principe du système d'asservissement Gendron

L'asservissement de la machine, (fig. 165), évitant l'intervention de l'ouvrier peut être assuré pendant l'usinage. Lorsque la cote désirée est atteinte, l'amplificateur à soupape, actionné par le doigt, provoque le maximum de pression et la membrane du mano-contacteur Solex ferme le circuit du relais électro-magnétique qui commande l'arrêt d'enfoncement du chariot porte-meule.

D. CONTROLE STATISTIQUE (1).

Le contrôle statistique est basé sur l'étude mathématique de la loi de Laplace Gauss, dite « *loi des grands nombres* ».

En ce qui concerne le contrôle dimensionnel, l'essentiel se résume ainsi :

1° Dans des lots de pièces obtenues sans modification de réglage de l'usinage, on compte toujours le même pourcentage de cotes qui s'écartent de la valeur moyenne d'une quantité donnée.

2° La mesure des cotes de quelques pièces du lot prélevées périodiquement permet de calculer la valeur moyenne de la cote du lot et, pour un pourcentage de pièces donné, le maximum d'écart de leurs cotes par rapport à la cote moyenne.

La figure 166 montre qu'on peut donc contrôler le pourcentage de pièces bonnes d'un lot en en calculant la cote moyenne et l'écart maximum **e** par rapport à cette cote.

L'interprétation des résultats se fait en comparant la position de la zone de dispersion et la position de la tolérance.

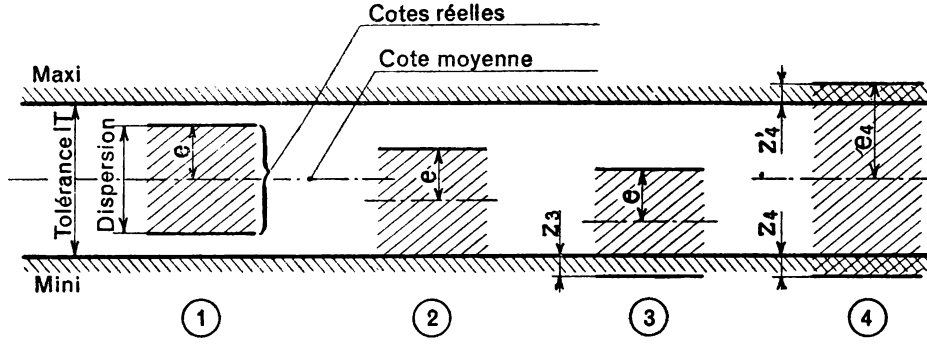


Fig. 166: Interprétation du contrôle statistique :
① bon réglage ② réglage limite ③ réglage rendu incorrect par déplacement de la cote moyenne ④ réglage impossible à cause de la trop grande dispersion

Exemples d'interprétation (fig. 166).

En **1**, les cotes sont toutes comprises dans la tolérance ; la fabrication est bien réglée.

En **2**, les cotes mini sont à la limite de la tolérance ; la cote moyenne s'est déplacée vers le mini mais sans augmentation de la dispersion, c'est-à-dire de l'écart **e**.

En **3** les pièces de la zone Z_3 sont inacceptables ; la cote moyenne s'est trop déplacée vers le mini, toujours sans augmentation de la dispersion.

En **4**, les pièces des zones Z_4 et Z'_4 sont inacceptables ; la cote moyenne est bien placée mais l'écart e_4 trop grand donne une trop forte dispersion, de sorte que les cotes limites ne sont plus dans la tolérance.

(1) Voir : Organisation industrielle (Tome II, applications industrielles) par A. Castell.

Le déréglage **3** est imputable à l'usure de l'outil, la cote moyenne s'étant déplacée progressivement. L'impossibilité **4** est imputable au mauvais état de la machine ou au manque d'homogénéité de la matière travaillée ou à de mauvaises conditions de travail (mauvais ablocage par exemple).

Le contrôle statistique doit donc s'exercer sur deux éléments. D'abord sur la valeur de la dispersion (double de l'écart calculé **e**) qui ne doit pas être supérieure à la tolérance ($2e < IT$). Ensuite sur la valeur de la cote moyenne qui, combinée avec la dispersion, ne doit pas donner de cotes en dehors de la tolérance.

Un prélèvement de 5 % seulement des pièces fabriquées, par 5 pièces à la fois, pour mesure et calcul, permet une surveillance très efficace de la fabrication, le maintien constant d'un bon réglage et, par suite, un contrôle économique et sûr.

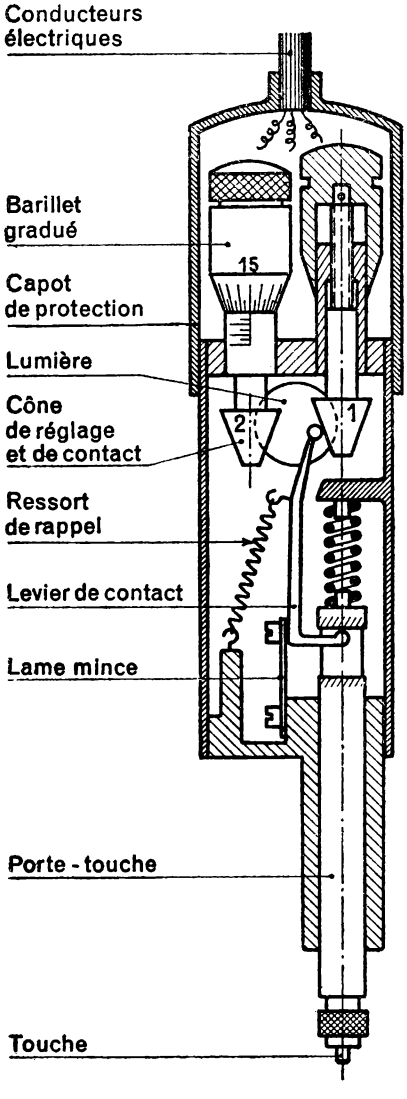


Fig.167: Schéma d'un palpeur électrique

IV. — APPAREILS DE CONTROLE ADAPTÉS AUX TRAVAUX DE SÉRIE

Dans le cas d'une production en grande série, le contrôle par utilisation de calibres à limites, de comparateurs... est long. D'autre part, lorsque les tolérances sont faibles, la mesure ne peut être faite avec fidélité qu'avec des appareils à dimensions variables munis d'amplificateurs le plus souvent électriques. Des contacts réglés en fonction de la tolérance allument des voyants de signalisation dont la couleur indique la position de la cote réelle par rapport aux limites.

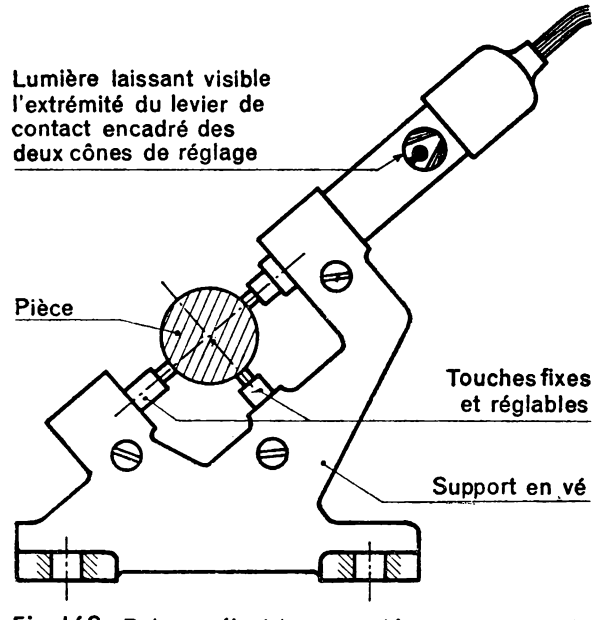


Fig.168: Palpeur électrique monté sur un support en vé

La figure 167 est le schéma d'un de ces appareils et la figure 168 le montre en position d'utilisation sur un support adapté à la pièce à contrôler.

A. ETALONNAGE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Soit à vérifier la cote 20 h 7 c'est-à-dire $20\ ^{-0,000}_{-0,021}$.

— Disposer sous le palpeur une cale d'épaisseur sensiblement égale à la cote moyenne, soit 20 — 0,010, et régler les cônes pour qu'ils encadrent l'extrémité du levier de contact mais sans être en contact avec lui et agir sur le réglage du support pour obtenir l'illumination du voyant blanc. La touche est alors dans la zone de mesure de la cote moyenne.

— Visser ensuite chacun des barillets pour obtenir l'illumination simultanée des voyants rouge et orange.

— Dévisser enfin les barillets pour que leur position corresponde aux limites de la tolérance soit : celui de droite pour que le cône **1** remonte de **11** μ et celui de gauche pour que le cône **2** remonte de **10** μ.

En cours de mesure, la pièce étant glissée entre les touches (fig. 168) l'illumination des voyants rouge ou orange indique respectivement que la cote mini ou la cote maxi est atteinte.

B. GROUPEMENT DE PLUSIEURS PALPEURS ÉLECTRIQUES

Le montage de la figure 169 est réalisé pour la mesure des 4 diamètres fonctionnels d'un arbre. Chaque palpeur est branché au coffret de signalisation sur lequel sont fixés extérieurement la silhouette de la pièce et le tableau des voyants. A chaque cote correspondent 3 voyants nécessaires : blanc, rouge et orange.

Remarque. Lorsque la forme de la pièce le permet, on peut vérifier jusqu'à 20 cotes simultanément (diamètres, épaisseurs et longueurs des

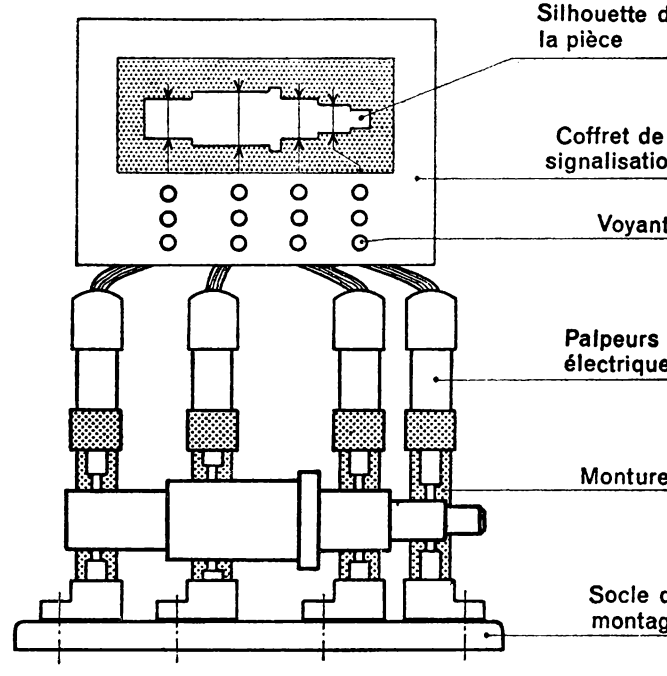


Fig. 169: Schéma de l'appareillage pour le contrôle simultané de plusieurs cotes par groupement d'éléments standards

différents éléments). L'opérateur n'intervenant pas dans la mesure, le résultat du contrôle est absolument sûr.

V. — GAMME DE CONTROLE

La gamme de contrôle mentionne les cotes à vérifier, les vérificateurs à utiliser et l'ordre des vérifications. On l'étudie en même temps que la gamme d'usinage dont elle est le complément au cours de la fabrication.

Etude d'une gamme de contrôle et des appareillages spéciaux pour une série renouvelable, de 200 leviers de réglage de débit pour pompe alternative (fig. 170).

Les opérations d'usinage ne sont rappelées qu'à titre chronologique, sans recher-

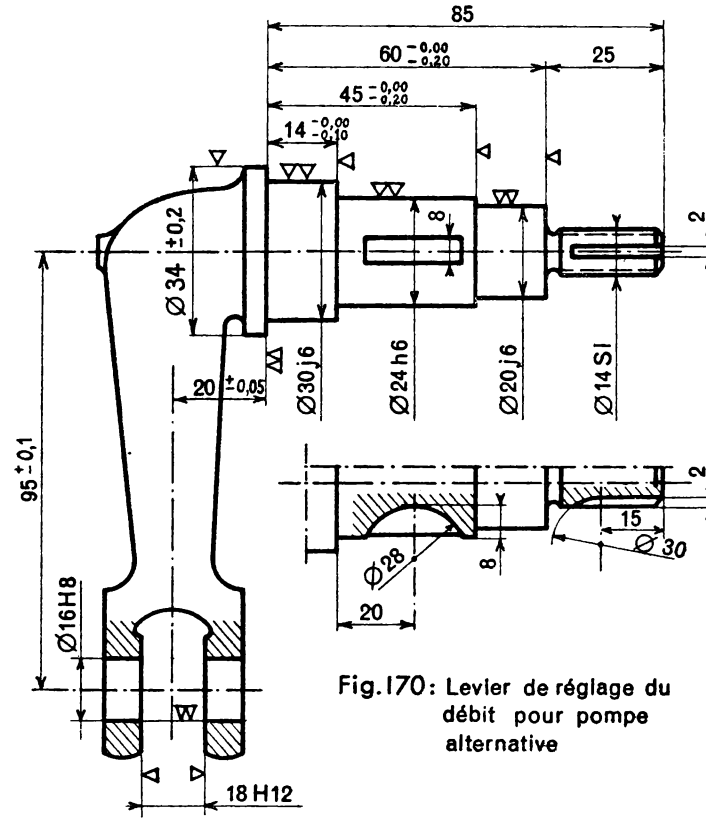


Fig.170: Levier de réglage du débit pour pompe alternative

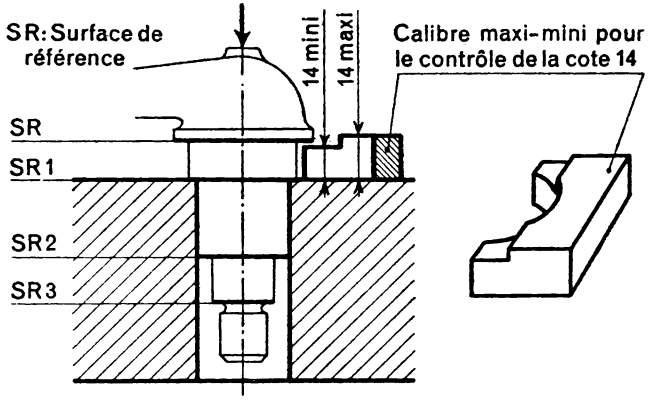


Fig.171: Principe de la vérification des cotes 14, 45 et 60 à l'aide d'un calibre maxi-mini

che des détails, pour justifier l'ordre et l'opportunité du contrôle (tableau 2).

A. CONTROLE DES LONGUEURS 14, 45, 60.

Les cotes 14, 45, 60 obtenues par travail en butée, ont des tolérances très larges. Le contrôle sera partiel et on peut utiliser, soit un pied de profondeur, soit un socle présentant une surface de réfé-

rence à partir de laquelle la vérification sera faite par cales ou calibres maxi-mini (fig. 171) ou par un doigt commandant un comparateur à cadran.

OPÉRATIONS D'USINAGE	OPÉRATIONS DE CONTROLE	VÉRIFICATEURS
Perçage des centres	Non contrôlé (responsabilité de l'opérateur). L'opération suivante décèlera les oublis.	
Tournage et rectification de l'arbre	Contrôle des diamètres 30 j 6 - 24 h 6 - 20 j 6.	Calibres à mâchoires doubles.
	Diamètre 34 non contrôlé.	
	Longueurs 14 - 45 - 60.	Calibre spécial (Voir paragraphe A).
Filetage	Contrôle d'un filetage de qualité moyenne.	Bague filetée simple.
Fraisage et perçage de la chape	Contrôle de la largeur 18 H 12.	Jauge plate double.
	Contrôle de l'alésage ⌀ 16 H 8.	Jauge plate ou tampon lisse double.
	Contrôle du déport de la chape 20 ± 0,05.	Calibre spécial (Voir paragraphe B).
	Contrôle de l'entraxe 95 ± 0,1.	
Fraisage du logement de clavette et de la rainure.	Non contrôlé (responsabilité de l'opérateur). Cependant, prévoir une vérification de quelques pièces au hasard, pour le logement de clavette, à l'aide d'une clavette type.	

Tableau n° 2. Gamme de contrôle d'un levier de réglage de débit de pompe alternative.

B. ÉTUDE DU CONTROLE DU DÉPORT DE LA CHAPE ET DE L'ENTRAXE DU LEVIER

Le fraisage de la chape, son perçage et son alésage, sont exécutés en montages d'usinage. Le contrôle du déport de la chape et de l'entraxe, n'aura donc pour but que de déceler le déréglage du montage par rapport à l'outil.

La figure 172 donne le principe de l'appareillage permettant le contrôle simultané des cotes de déport 20 ± 0,05 et de l'entraxe 95 ± 0,1.

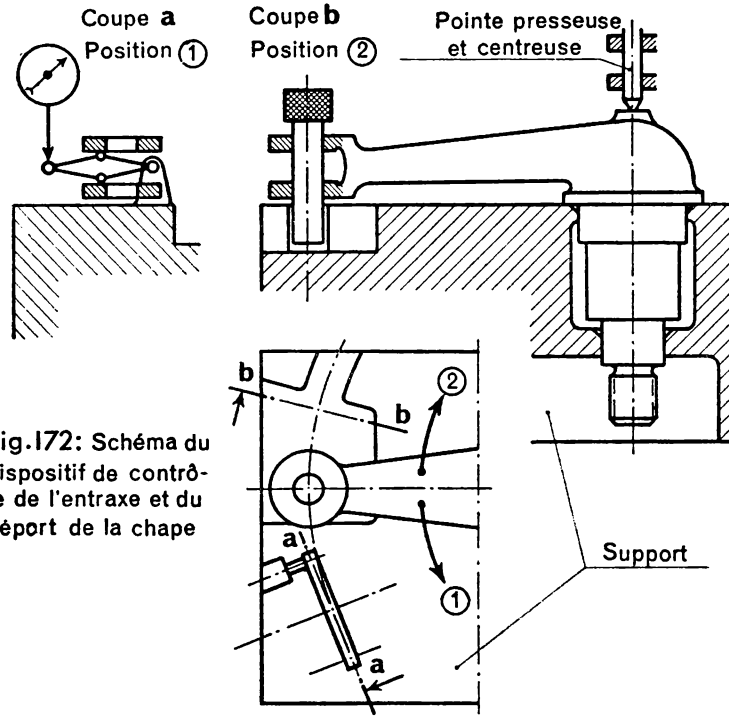


Fig.172: Schéma du dispositif de contrôle de l'entraxe et du déport de la chape

1° Contrôle du déport, position 1 (coupe **a**) suivant figure 173.

On le vérifie à l'aide d'un comparateur qui s'appuie sur le galet **G** d'un parallélogramme articulé au point fixe **P** du socle. Le ressort de rappel oblige les galets intermédiaires à coller à la chape et le déplacement correspondant du centre **C** se trouve amplifié en **G**.

Remarque. Il faut éliminer tout dispositif qui ne serait pas indépendant de la variation de largeur de la chape. Comme on le voit sur la figure 174, une cale fixe sur laquelle la chape pourrait passer, ne garantirait pas le respect de la tolérance de déport imposée.

En effet, une chape au maximum H_{12}, mise au contact de la cale et considérée comme bonne aura un déport hors tolérance égal à $0{,}05 + \frac{\text{tolérance } H_{12} \text{ maxi}}{2}$.

Pour éviter cette incorrection du dispositif, il faut que le palpeur de contrôle reste toujours centré sur l'axe réel de la chape. Le système à parallélogramme préconisé respecte toujours cette condition.

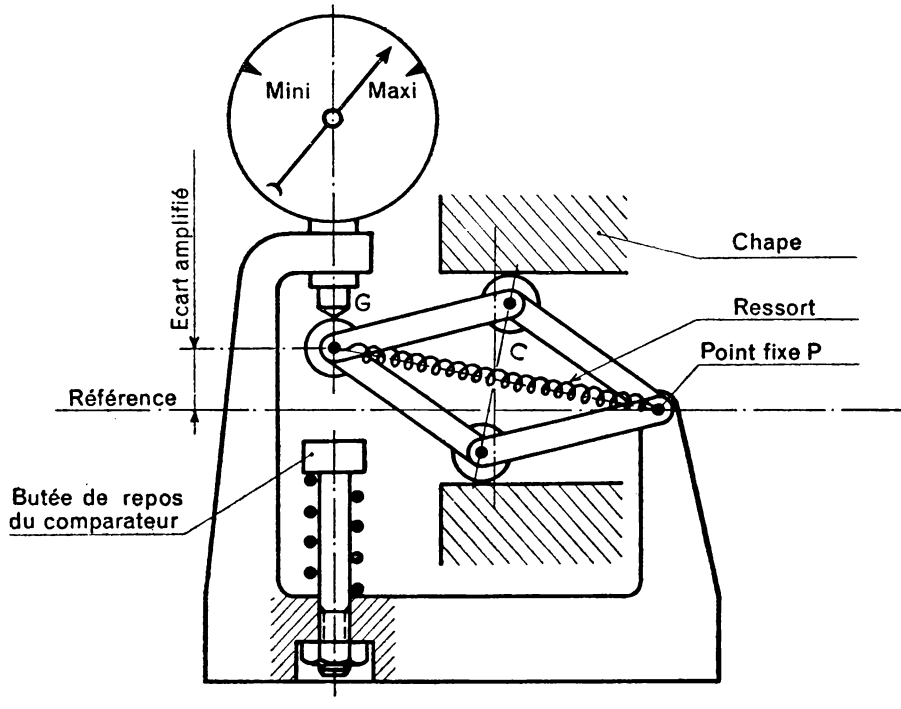


Fig. 173 : Réalisation du dispositif de contrôle du déport

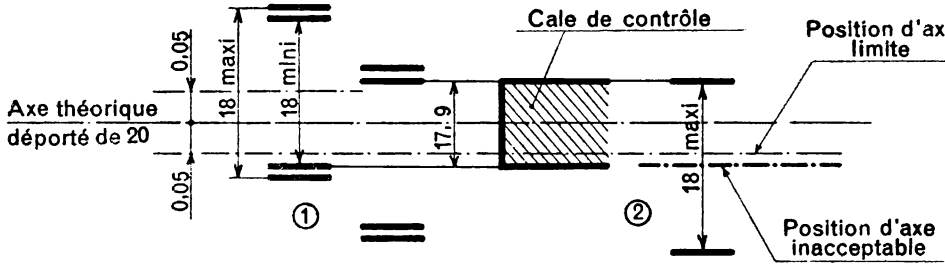


Fig. 174 : La cale simple de largeur 18 - 2 × 0,05 ne permet pas un contrôle efficace. En ① sont figurées les limites des chapes acceptables et en ② une chape inacceptable échappant au contrôle

2° Contrôle de l'entraxe, position 2 (coupe **b**) suivant figure 175.

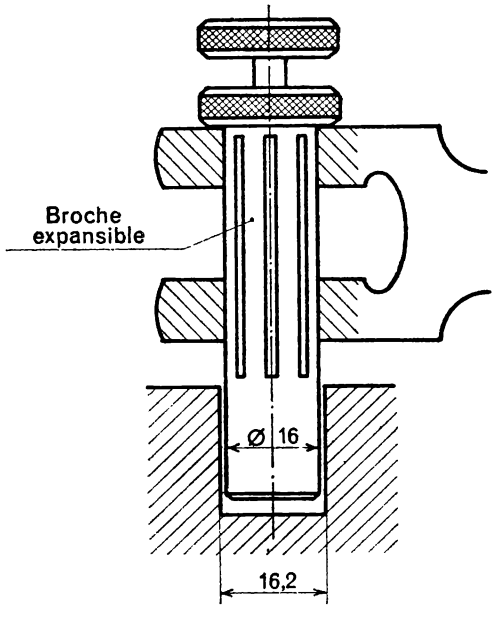


Fig. 175: Contrôle sensitif de l'entraxe

On le vérifie par le passage d'une broche portée par la chape entre 2 épaulements.

La broche est expansible dans sa partie médiane et se centre parfaitement dans l'alésage. La pointe presseuse assujettit le levier et le centre en même temps dans l'alésage du support. La rainure dans laquelle doit passer l'extrémité de la broche est à 95 de cet alésage et sa largeur est de 16 + (2 × 0,1) = 16,2.

La difficulté de rotation de la pièce serrée par la pointe presseuse peut provoquer un effort qui empêche le contrôleur de déceler le forcement de la broche dans la rainure. Pour éviter cet inconvénient, il paraît plus logique de disposer dans la rainure plus large 2 touches commandant chacune un comparateur à cadran sur lequel un index marque la limite de la cote permise (fig. 176).

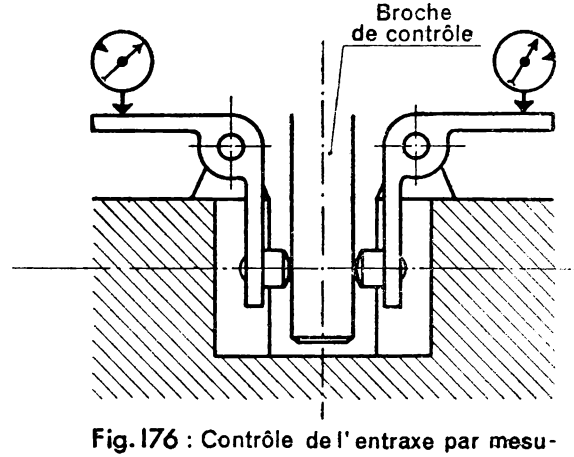


Fig. 176 : Contrôle de l'entraxe par mesure d'écart

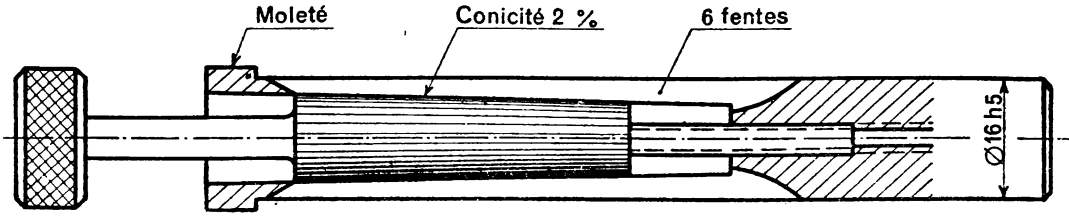


Fig.177 : Axe de contrôle expansible

Remarque. Comme nous l'avons vu pour la chape précédente, il faut que l'axe de l'alésage soit repéré par un dispositif indépendant de la variation de cote de l'alésage. C'est pour cette raison que nous avons prévu un axe expansible dans sa partie médiane (fig. 177). L'extrémité qui sert de référence, non atteint par les fentes, conserve évidemment un diamètre invariable.

IMPRIMERIES OBERTHUR.
Dépôt légal imprimeur 6670.